

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva

***OTÁZKA ÚČINNOSTI FILTRŮ
KLIMATIZACE DOPRAVNÍCH LETADEL
Z HLEDISKA ZÁCHYTU INFEKČNÍCH
AGENS ŠÍŘENÝCH ZE ZDROJE UVNITŘ***

Disertační práce

Ing. Milan Mráz

Kladno, březen, 2025

Doktorský studijní program: P1032D020001 - Civilní nouzová připravenost

Školitel: MUDr. Emil Pavlík, CSc.

Czech Technical University in Prague
Faculty of Biomedical Engineering

Department of Health Care and Population Protection

***THE ISSUE OF THE EFFECTIVENESS OF
AIRLINERS AIR CONDITIONING FILTERS
IN TERM OF INFECTED AGENTS CAPTURE
WITH SOURCE OF DISTRIBUTION INSIDE***

Doctoral Thesis

Milan Mráz

Kladno, March, 2025

Ph.D. Programme: P1032D020001 Civil Emergency Protection

Supervisor: Emil Pavlík

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Otázka účinnosti filtrů klimatizace dopravních letadel z hlediska zachytu infekčních agens šířených ze zdroje uvnitř vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Poděkování

Tato práce by nevznikla bez podpory řady lidí, kterým bych rád vyjádřil své upřímné poděkování. Jmenovitě pak musím zmínit tři z nich.

Nejprve mou milovanou manželku, které bych chtěl poděkovat za neustálou podporu a za to, že mi dodávala potřebný prostor a sílu pokračovat i v těžkých chvílích. Její trpělivost a pochopení byly pro mě nesmírně důležité.

Dále bych chtěl vyjádřit svou hlubokou vděčnost kolegyni MUDr. Daniele Obitkové, Ph.D., která mi poskytla cenné rady a odbornou pomoc v průběhu celého výzkumu, publikační činnosti a také při psaní této práce. Její odborné znalosti a ochota sdílet své zkušenosti byly neocenitelné.

Zvláštní poděkování pak patří mému školiteli, panu MUDr. Emilu Pavlíkovi, CSc., za jeho vedení, podporu a cenné připomínky. Jeho odborné rady, trpělivost a motivování byly klíčové pro úspěšné dokončení této disertační práce.

Abstrakt

Cestování letadlem je spojeno s dlouhodobým pobytem v uzavřeném prostoru s nucenou výměnou vzduchu. Tento vzduch je většinou částečně recyklován přes HEPA filtry. Při řešení otázek spojených se zamezením přenosu vysoce nakažlivých nemocí leteckou dopravou vyvstala otázka, zda tyto filtry nemohou přispívat k šíření infekčních agens. V rámci výzkumu jsme získali vzduchové filtry z komerčního letadla, na kterých bylo provedeno kvalitativní bakteriologické hodnocení a multiplexní PCR testování s cílem zjistit přítomnost virů.

Byla zjištěna přítomnost patogenních bakterií *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Streptococcus pneumoniae* a gramnegativních bakterií *Pseudomonas aeruginosa*, *Morganella morganii* a *Escherichia coli*. Viry při testování multiplexní PCR metodou nebyly prokázány.

Z výsledků můžeme předpokládat, že HEPA filtry mohou přispívat k šíření infekčních agens do kabiny letadla. Proto bylo jako další krok navrženo technické řešení za účelem zlepšení tohoto stavu. Tím je doplnění HEPA filtrů nanotextilními filtry. Vzhledem k zamezení přístupu k leteckým filtrům a útlumu letecké dopravy za pandemie covidu-19, byl pilotního projekt realizován s domácím čističem vzduchu s HEPA filtrem, za který byl zařazen filtr s nano textilií, konkrétně polyamidem 6 o poréznosti 50 nm. Projekt se soustředil převážně na záchyt virů, protože záchyt bakterií byl prokázán na HEPA filtrech. Výsledkem je, že multiplexní PCR metoda opakovaně detekovala koronavirus 229 E, rhinoviry, enteroviry a adenoviry. Studie tak ukázala, že vybraná nanotextilie je schopna zachytit virus.

Následoval samotný návrh zařízení, které by mohlo být dále rozvíjeno a ve výsledku instalováno do vzduchového rozvodu letadel.

Klíčová slova

Letadlo, letoun, filtroventilační systém, HEPA filtr, mikrobiologická kontaminace, nanotextilie.

Abstract

Air travel involves spending extended periods in an enclosed space with forced air exchange. This air is mostly partially recycled through HEPA filters. When addressing issues related to preventing the transmission of highly contagious diseases via air travel, the question arose whether these filters could contribute to the spread of infectious agents. As a part of the research we obtained air filters from a commercial aircraft on which qualitative bacteriological evaluation and multiplex PCR testing were conducted to detect the presence of viruses.

The presence of bacteria such as *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Streptococcus pneumoniae*, and gram-negative bacteria such as *Pseudomonas aeruginosa*, *Morganella morganii*, and *Escherichia coli* was detected. Viruses were not detected using the multiplex PCR method.

From the results we can infer that HEPA filters may contribute to the spread of infectious agents into the aircraft cabin. Therefore, a technical solution was proposed as the next step to improve this situation. This involves supplementing HEPA filters with nanofabric filters. Due to restricted access to aviation filters and the decline in air travel during the COVID-19 pandemic, the pilot project was carried out using a domestic air purifier with a HEPA filter, which was replaced with a filter made of nanofabric, specifically polyamide 6 with a porosity of 50 nm. The project focused mainly on virus capture, as bacterial capture was proven on HEPA filters. The result is that the multiplex PCR method repeatedly detected coronavirus 229 E, rhinovirus, enterovirus, and adenovirus. The study thus showed that the selected nanofabric is capable of capturing viruses.

This was followed by the design of a device that could be further developed and eventually installed in the aircraft's air distribution system.

Keywords:

Airplane, aircraft, air conditioning, HEPA filter, microbiological contamination, nanofabric.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	10
3. Metody zpracování.....	11
3.1. Přenos infekčních nemocí	11
3.2. Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla	11
3.3. Laboratorní zkoumání nanotextilie z HEPA filtru čističky vzduchu	13
3.4. Chemikálie, materiál a zařízení	16
3.5. Systém výměny vzduchu v letadle	18
4. Výchozí stav	19
4.1. Případy přenosu infekčních nemocí	19
4.1.1. Nákaza virem H1N1 na letu Cancún - Birmingham	19
4.1.2. Nákaza virem H1N1 na letu Los Angeles - Soul	22
4.1.3. Nákaza koronavirem SARS-CoV-1 na letu Hongkong - Peking	24
4.1.4. Velikost biologických agens	26
4.1.5. Metoda určení kontaktů a šíření virů v kabině	28
4.2. Systém filtroventilace letadel	29
4.2.1. Systém řízení prostředí.....	32
4.2.2. Systém filtroventilace v letounu A 320 family	34
4.2.3. Systém filtroventilace v letounu B 737	45
4.3. Specifikace zkoumaných filtrů letounů.....	57

4.3.1.	HEPA filtry	58
4.3.2.	HEPA filtry a záchyt bakterií	60
4.4.	Pilotní pokus s nanotextilním filtrem	61
4.4.1.	Nanotextilie	63
4.4.2.	Nanotextilie s možností samostatné dezinfekce	68
4.4.3.	Elektrická energie u letounů 737 a A 320 family	71
4.5.	Biofilm	72
4.6.	Nošení masek jako ochrana proti biologickým agens	74
5.	Výsledky.....	77
5.1.	Návrh zařízení	84
6.	Diskuse	92
7.	Závěr.....	97
8.	Seznam použité literatury	99
9.	Seznam zkratk	116
10.	Seznam použitých obrázků.....	118
11.	Seznam použitých tabulek.....	120
12.	Seznam příloh.....	122
	Příloha 1 – Perspektivní pohled	1
	Příloha 2 – Řez A-A	1
	Příloha 3 – Řez B-B a detail filtru.....	1

1. Úvod

V rámci výkonu svého povolání, zaměstnance Hasičského záchranného sboru Letiště Praha, a. s., jsem po vypuknutí epidemie eboly, která probíhala v letech 2013 – 2016, řešil opakovaně postupy pro zajištění mimořádné události s výskytem vysoce nakažlivé nemoci na palubě letadla. Kromě mnoha jiných otázek jsme se v mezirezortních pracovních skupinách při Ministerstvu životního prostředí České republiky a Ministerstvu vnitra - generálním ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky zabývali i způsobem šíření nemoci v letadlech. Důvodem bylo určení tzv. kontaktů, tj. osob, které byly v přímém kontaktu s nemocným cestujícím nebo infekčními agens, a jsou tedy potencionálně také nakaženi. Přestože se nakonec přistoupilo k určení kontaktů na základě mezinárodních zkušeností a doporučení, zůstávala otevřená a stále se vracela otázka šíření infekčních agens jinými cestami, a to i díky výskytu epidemií dalších nemocí.

Proto jsme pod vedením MUDr. Emila Pavlíka, CSc. společně s kolegyní MUDr. Danielou Obitkovou, Ph.D. začali laboratorně zkoumat filtry filtroventilačního systému komerčního letounu. Již tehdy jsme se orientovali na nanotextilie ve smyslu jejich možného použití pro doplnění stávajících HEPA filtrů a zvýšení účinnosti jejich filtrace. S čímž jsme následně experimentovali, protože jsme předpokládali potvrzení naší teze, tj. že filtry mohou přispívat k šíření biologických agens, protože neumí zadržet viry.

V roce 2019 začala pandemie onemocnění covid-19 způsobeného koronavirem. Kromě jiného přinesly následující roky významné poznatky o využití a účinnosti nanotextilií, a to právě v námi uvažované oblasti tzv. filtroventilace.

2. Cíle práce

V rámci zkoumané problematiky, tj. otázky účinnosti filtrů klimatizace dopravních letadel z hlediska zachytu infekčních agens šířených ze zdroje uvnitř, bylo postupováno v několika na sebe následujících krocích. Jejich popis:

- zjistit, zda došlo k případům šíření infekční nemoci v letadle, které by nasvědčovaly možnosti šíření filtroventilací;
- prozkoumat filtroventilaci civilních dopravních letadel s cílem zjistit, jaké bakterie a viry jsou schopny zachytit;
- v případě negativního zachytu virů filtry vzduchotechniky letounů provést pilotní projekt spočívající v osazení čističky vzduchu s HEPA filtrem o filtr z nanotextilie; cílem bylo zjistit, zda dojde tímto způsobem k zachytu virů;
- pokud dojde k zachytu virů na nanotextilii, analyzovat systém výměny vzduchu v letadlech s cílem navrhnout jejich doplnění nanotextilním filtrem.

Výstupem této práce je teoretický návrh zařízení, které by mohlo být instalováno do filtroventilace letadel, aby se zvýšila její účinnost. Je nutno podotknout, že návrh je teoretický bez přesných měr. Důvodem byla nemožnost jej reálně vyzkoušet v systému letounů.

3. Metody zpracování

3.1. Přenos infekčních nemocí

Pro určení případů, ve kterých mohlo dojít k přenosu infekční nemocí filtroventilačním systémem letadla byla zvolena rešerše. Při její aplikaci jsme se zaměřili na případy, u kterých bylo možné prokazatelně dohledat šíření infekce.

3.2. Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla

Při laboratorním zkoumání filtrů byly nejdříve provedeny suché ze vstupní a výstupní strany filtrů, vždy po 100 stěrech, a to náhodně po celém povrchu filtru s tím, že se postupovalo podle metody uvedené v normě ČSN EN ISO 18593 Mikrobiologie potravinového řetězce – Horizontální metody specifikující techniky vzorkování z povrchů. Všechny úkony spojené s odběrem vzorků a jejich kultivací byly prováděny v biologické bezpečnostní skříni s úrovní ochrany BSL 2, viz Obrázek 2, kde je pod č. 1 samotný HEPA filtr. Bližší informace k filtru viz kapitola 4.3 Specifikace zkoumaných filtrů .

K suchým stěrům byly použity polyesterové tampony, na každý stěr z vstupní i výstupní plochy zvlášť. Tampony se vytřepávaly do fyziologického roztoku (viz Obrázek 2, číslo 3). Kultivace probíhala na médiích připravených v Ústavu imunologie a mikrobiologie 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy (viz Obrázek 2, číslo 4). Konkrétně byl použit krevní agar, krevní agar s 5 % NaCl, Mueller-Hintonův agar, Endův agar a MacConkeyův agar. Pro pěstování plísní byl použit Sabouraud agar. Kultury byly pěstovány v aerobní a anaerobní atmosféře po dobu 24 hodin v laboratorním inkubátoru při konstantní teplotě $36\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro identifikaci bakteriálních druhů bylo použito Gramovo barvení a imerzní mikroskopie. Pro přesnou identifikaci byly použity další mikrobiologické identifikační testy. Pro stanovení bakterií pomocí proteomického profilu byl použit systém hmotnostní spektrometrie MALDI-TOF. Aby se zabránilo kontaminaci, byly povrchy a zařízení ošetřovány příslušnými dezinfekčními prostředky včetně Termi-DNA-tor sprej.

Pro zjištění přítomnosti virů na HEPA filtru byla použita komerční technologie multiplexní polymerázové řetězové reakce (dále jen PCR) BioFire FilmArray 2.0.

Jedná se o plně automatizovaný multiplexní PCR systém určený pro přímý průkaz respiračních

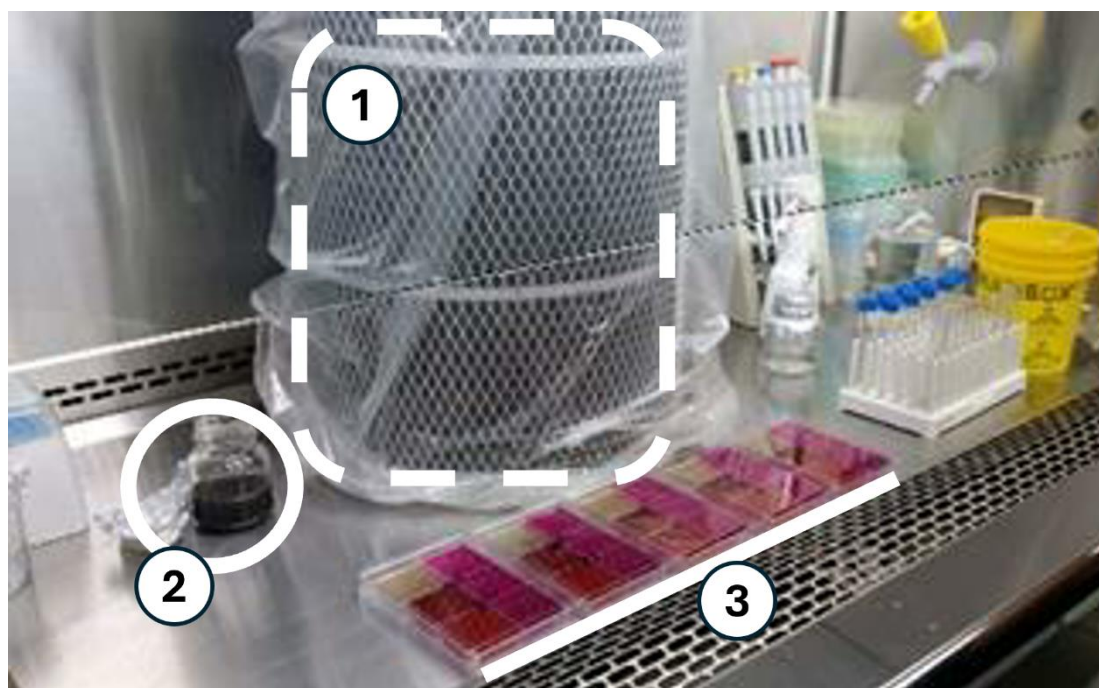
infekčních agens z odebraných vzorků. Pro diagnostiku byl použit respirační panel, který je určen hlavně pro vyhledávání virů napadající horní cesty dýchací. Panel je cílen na 17 virů a 3 bakterie uvedené v tabulce Tabulka 1.

Tabulka 1 – Spektrum respiračního panelu analyzátoru BioFire FilmArray 2.0 [1]

Název	Druh	Název	Druh
Adenovirus	Virus	Chřipka A/H3	Virus
Koronavirus 229E	Virus	Chřipka typu B	Virus
Koronavirus HKU1	Virus	Parachřipka 1	Virus
Koronavirus NL63	Virus	Parachřipka 2	Virus
Koronavirus OC43	Virus	Parachřipka 3	Virus
Enterovirus	Virus	Parachřipka 4	Virus
Lidský rhinovirus	Virus	Lidský respirační syncytiální virus	Virus
Lidský metapneumovirus	Virus	<i>Bordetella pertussis</i>	Bakterie
Chřipka A	Virus	<i>Chlamydomphila pneumoniae</i>	Bakterie
Chřipka A/H1N1/2009	Virus	<i>Mycoplasma pneumoniae</i>	Bakterie

Odběr vzorků pro toto testování probíhal tak, že byly opět vzaty suché stěry ze vstupní a výstupní strany filtrů s tím, že tampony byly vytřepány do pufru respiračního panelu pro systém BioFire FilmArray 2.0. Stěrů bylo provedeno 12, tzn. 6 pro vstupní a 6 pro výstupní stranu.

Obrázek 1 – Příprava odběru vzorků z HEPA filtru letounu.



3.3. Laboratorní zkoumání nanotextilie z HEPA filtru čističky vzduchu

V rámci tohoto pokusu nebyly kultivovány bakterie pro jejichž zachycení HEPA filtrem nebyly pochyby, ale byl použit systém BioFire FilmArray 2.0 a QIAStat DX 1.0. Ten používá metodu PCR s reverzní transkripcí (dále jen RT-PCR).

Postupně byly použity panely:

- respirační panel (BioFire FilmArray 2.0), viz kapitola 3.2 Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla;
- plicní panel (BioFire FilmArray 2.0), který určuje hlavně bakterie, ale také viry, viz Tabulka 2;
- respirační panel SARS CoV-2 (QIAStat DX Analyzer 1.0), jehož cílení viz Tabulka 3.

Tabulka 2 – Spektrum plicního panelu analyzátoru BioFire FilmArray 2.0 [2]

Název	Druh	Název	Druh
<i>Acinetobacter baumannii</i>	Bakterie	<i>Streptococcus pyogenes</i>	Bakterie
<i>Enterobacter cloacae complex</i>	Bakterie	<i>Chlamydia pneumoniae</i>	Bakterie
<i>Escherichia coli</i>	Bakterie	<i>Legionella pneumophila</i>	Bakterie
<i>Haemophilus influenzae</i>	Bakterie	<i>Mycoplasma pneumoniae</i>	Bakterie
<i>Klebsiella aerogenes</i>	Bakterie	Adenovirus	Virus
<i>Klebsiella oxytoca</i>	Bakterie	Koronavirus	Virus
<i>Klebsiella pneumoniae group</i>	Bakterie	Lidský metapneumovirus	Virus
<i>Moraxella catarrhalis</i>	Bakterie	Enterovirus	Virus
<i>Proteus spp.</i>	Bakterie	Lidský rhinovirus	Virus
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bakterie	Chřipka typu A	Virus
<i>Serratia marcescens</i>	Bakterie	Chřipka typu B	Virus
<i>Staphylococcus aureus</i>	Bakterie	Parachřipka	Virus
<i>Streptococcus agalactiae</i>	Bakterie	Respirační syncytiální virus	Virus
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	Bakterie		

Tabulka 3 – Spektrum respiračního panelu SARS CoV-2 pro QIAStat DX® Analyzer 1.0 [3]

Název	Druh	Název	Druh
Adenovirus	Virus	Orthomyxovirus	Virus
Bocavirus Parvovirus	Virus	Parachřipka 1	Virus
Koronavirus	Virus	Parachřipka 2	Virus
Koronavirus 229E	Virus	Parachřipka 3	Virus
Koronavirus HKU1	Virus	Parachřipka 4	Virus
Koronavirus NL63	Virus	Paramyxovirus	Virus
Koronavirus OC43	Virus	Respirační syncytiální virus A	Virus
Lidský metapneumovirus A	Virus	Respirační syncytiální virus B	Virus
Lidský metapneumovirus B	Virus	Rhinovirus	Virus
Chřipka A	Virus	Enterovirus	Virus
Chřipka A/H1	Virus	SARS-CoV-2	Virus
Chřipka A/H1N1/2009	Virus	<i>Mycoplasma pneumoniae</i>	Bakterie
Chřipka A/H3	Virus	<i>Legionella pneumophilla</i>	Bakterie
Chřipka B	Virus	<i>Bordetella pertussis</i>	Bakterie

Odběr vzorků pro analyzátory byl opět pořizován stěry, a to stejným postupem jako v předchozí kapitole, viz 3.2 Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla, tj. jejich vytřením do pufru pro příslušný panel. Použití jednotlivých panelů, viz Tabulka 4.

Tabulka 4 – Použití panelů při zkoumání nanotextilie z HEPA filtru čističky vzduchu

Panel	Použitý HEPA filtr a uhlíkový filtr	Samotná nanotextilie	Nový HEPA filtr a nanotextilie
Respirační panel (BioFire FilmArray 2.0)	Ano	–	–
Plicní panel (BioFire FilmArray 2.0)	–	Ano	–
Respirační panel SARS CoV-2 (QIAStat DX Analyzer 1.0)	–	–	Ano

3.4. Chemikálie, materiál a zařízení

Chemikálie použité v kapitolách 3.2 Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla a 3.3 Laboratorní zkoumání nanotextilie z HEPA filtru viz Tabulka 5.

Tabulka 5 – Použité chemikálie

Typ chemikálie	Dodavatel	Poznámka
Souprava pro Gramovo barvení	P - LAB a.s.	Od Carl Roth GmbH
Aceton	PENTA s.r.o.	–
Ethylalkohol	PENTA s.r.o.	–
Fyziologický roztok 0,9% NaCl	B. Braun Medical s. r. o.	Odběrový roztok
MALDI matrice alfa-Cyano-4-hydroxycinnamová kyselina	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	–
Ředící rozpouštědlo Brukker	Merck spol. s r. o.	–
Termi-DNA-tor sprej	DYNEX TECHNOLOGIES, s. r.o.	Zamezení kontaminace cizí DNA při odběru vzorku

Materiál a zařízení použité v kapitolách 3.2 Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla a 3.3

Laboratorní zkoumání nanotextilie z HEPA filtru viz Tabulka 6.

Tabulka 6 – Použitý materiál a zařízení

Typ chemikálie	Dodavatel	Poznámka
Polyesterové (Dacron) tampony s plastovou tyčinkou	INSET s.r.o.	Baleny jednotlivě
Petriho misky, ø 9 cm	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	Kultivace
Krevní agar	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
Krevní agar s 5% NaCl	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
Mueller-Hintonův agar	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
Sabouraudův agar	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
Endův agar	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
MacConkeyův agar	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	—
Biologická bezpečnostní skříň (ochrana BSL-2)	SCHOELLER INSTRUMENTS, s.r.o.	Odběr vzorků a manipulace s nimi
Laboratorní inkubátor	MERCI, s.r.o.	Značka Memmert
Sáčky Oxoid AnaeroGen	Merck spol. s r. o.	Anaerobní kultivace
Skleněné mikroskopické destičky	P - LAB a.s.	—
Plastové pipety a pipetové špičky	P - LAB a.s.	—
Mikroskop Olympus CX 23	—	Imersní mikroskopie Zvětšení 1 000x

ENTEROtest 24	Erba Lachema s.r.o.	Identifikace bakterií
STREPtest	Erba Lachema s.r.o.	Identifikace bakterií
OXItest	Erba Lachema s.r.o.	Identifikace bakterií
Prolex Staph Xtra Latex Kit	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	Identifikace bakterií
Hmotnostní spektrometr MALDI-TOF	BioVendor – Laboratorní medicína a.s.	Identifikace bakterií
Anylyzátor BioFire FilmArray 2.0	bioMérieux CZ s.r.o.	Určení nukleových kyselin, PCR metoda
Respirační panel	bioMérieux CZ s.r.o.	Pro analyzátor BioFire FilmArray 2.0
Plicní panel	bioMérieux CZ s.r.o.	Pro analyzátor BioFire FilmArray 2.0
Anylyzátor QIAStat DX 1.0	GeneTiCA s.r.o.	Určení nukleových kyselin, RT PCR metoda
Respirační SARS-CoV-2 panel	GeneTiCA s.r.o.	Pro analyzátor QIAStat DX 1.0

3.5. Systém výměny vzduchu v letadle

Při zkoumání filtroventilačního systému letadla byla několikrát provedena prohlídka zvolených typů letadel, během které probíhala i konzultace s techniky provádějícími jejich údržbu. Poté následovala rešerše a analýza technické dokumentace a jiných dostupných zdrojů, a to jak z oblasti samotné technologie, tak stran použití uvažovaného materiálu, tj. nanotextilie.

4. Výchozí stav

4.1. Případy přenosu infekčních nemocí

4.1.1. Nákaza virem H1N1 na letu Cancún - Birmingham

Dne 27. dubna 2009 byla ve Velké Británii potvrzena první nákaza virem H1N1. Stalo se tak u cestujícího, který letěl komerčním letadlem B 767-300 z mexického Cancúnu do britského Birminghamu. Let trval 9,5 hodiny. Cestující nastoupil let 20. dubna 2009. Kabina letadla byla rozdělena do tří částí se sedačkami a to na přední, střední a zadní část o celkovém počtu 282 sedadel. Obsazeno jich bylo 278. Cestující seděl v zadní části kabiny. Předpokládá se, že symptomy se u cestujícího objevily 18. dubna 2009 (2 dny před odletem) a během letu se u něj projevovaly jako horečka, kašel, bolest hlavy, bolest svalů a zimnice. Vzorek výtěru z nosohltanu, který od něj byl získán 24. dubna, byl testován metodou PCR s pozitivním výsledkem. S cestujícím letěl jeho společník, který byl při letu asymptomatický, ale 23. dubna 2009 se u něj příznaky objevily. I jeho vzorek z výtěru získaný 25. dubna 2009, a také testovaný PCR metodou, byl pozitivní. [4]

Jako kontakty byly následně určeny osoby, které seděly ve stejné řadě nebo ve dvou řadách před nebo za řadou, ve které seděl první cestující. To je v souladu s pokyny Světové zdravotnické organizace. Jednalo se celkem o 39 osob z toho byly 2 symptomatické (kašel, horečka), ale obě měly negativní výsledek PCR testu. Z cestujících bez symptomů byl virus prokázán u dalších dvou cestujících. První byl výše zmíněný společník, druhý byl cestující dvě řady za prvním nemocným cestujícím. V následujících dnech bylo z národní databáze nemocných určeno šest dalších případů této nemoci. U čtyř osob bylo zjištěno, že se také účastnily daného letu. Jeden z nich byl usazen ve střední části kabiny. Další dva byli usazeni v osmé a jeden páté řadě. Dvě osoby pak přišly do styku s cestujícími z tohoto letu, ale sami se jej neúčastnili. [4]

K uvedenému letu lze také dohledat studii, která kombinovala:

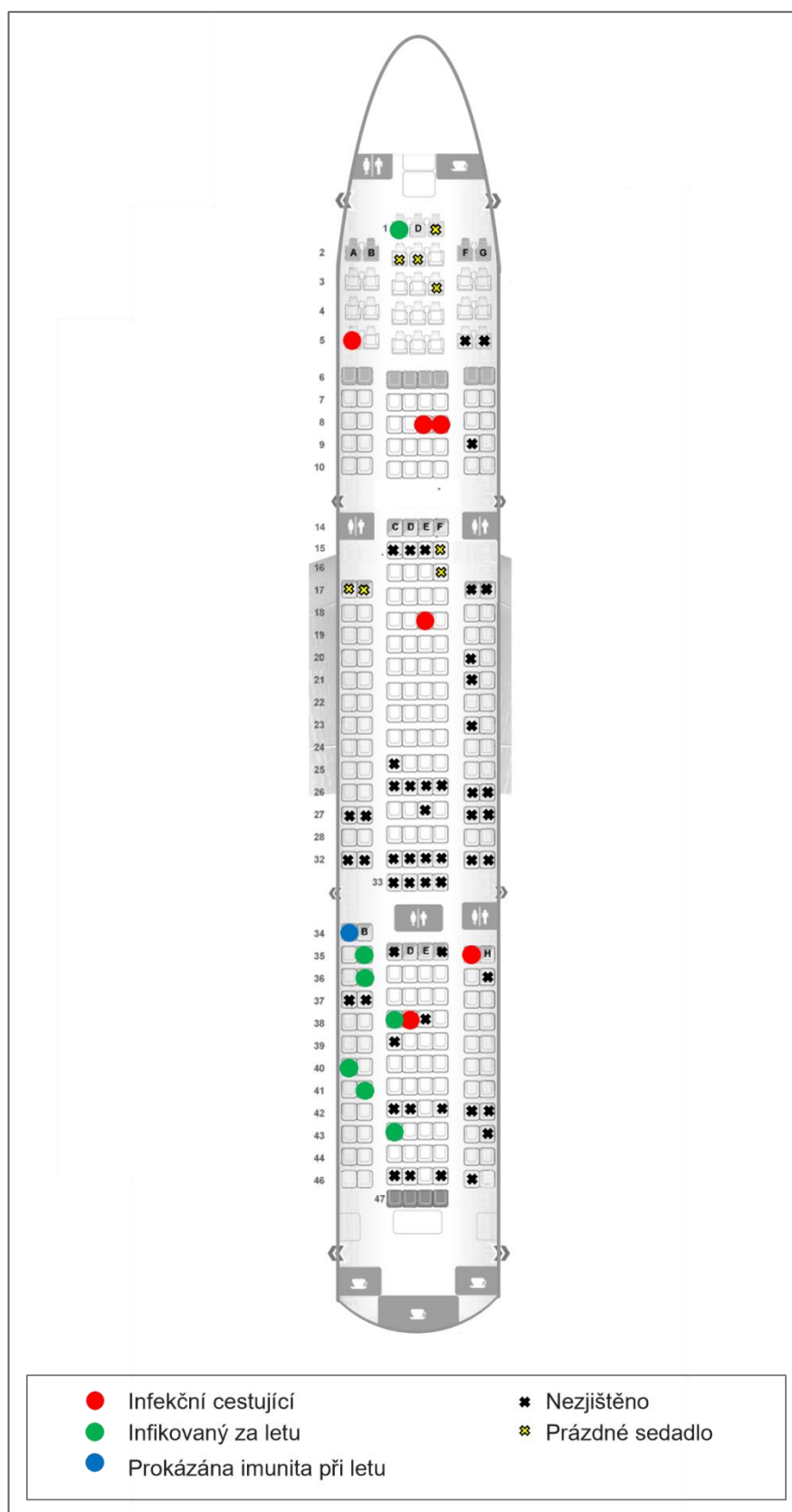
- prospektivní kohortovou studii využívající telefonické dotazování a trasování kontaktů;
- klinická data cestujících od britské Health Protection Agency;
- PCR testování;

- serologické testování. [5]

Tato studie uvádí, že u 30 cestujících bylo provedeno PCR testování, přičemž 7 z nich mělo pozitivní výsledek na virus H1N1. Sérologické testování bylo provedeno u 96 z 239 cestujících, pro které byla dostupná dostatečná klinická data. Z těchto 239 cestujících se 224 účastnilo kohortové studie s tím, že ta byla rozšířena ještě o 12 osob z trasování kontaktů. Výstupem této studie je Obrázek 2 s rozložením:

- infekčních cestujících, tj. cestujících s příznaky odpovídající chřipkovému onemocnění, které se objevily před letem a k jejichž vyléčení nedošlo dříve jako den před odletem;
- cestujících infikovaných za letu, tj. cestujících s příznaky odpovídající chřipkovému onemocnění, které se dostavily nejpozději 6 dní po příletu;
- cestujících s imunitou, tj. cestujících s příznaky odpovídající chřipkovému onemocnění, které odeznělo alespoň 2 dny před odletem;
- zdravý cestující, tj. cestující bez příznaků odpovídající chřipkovému onemocnění nebo se objevily 6 dní po příletu. [5]

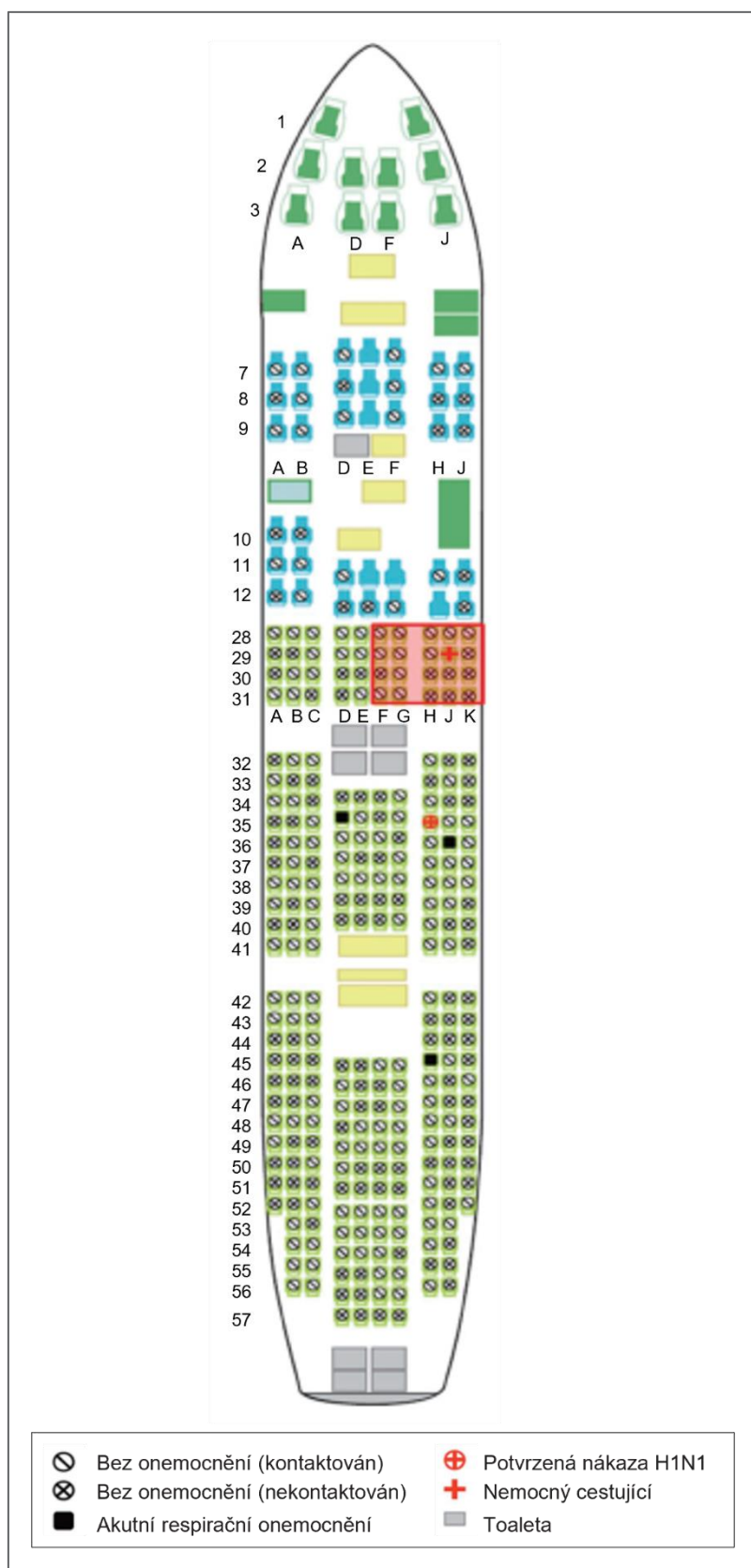
Obrázek 2 – Rozložení nemocných cestujících na letu Cancún – Birmingham [5]



4.1.2. Nákaza virem H1N1 na letu Los Angeles - Soul

První případ nakažení virem H1N1 v Korejské republice byl zaznamenán na letu Boeingu B 747 ze dne 25. dubna 2009 z Los Angeles do Soulu. Infekční cestující, která cestovala z Mexika a v Los Angeles přestupovala, se ráno v den odletu probudil s kašlem a horečkou. Po přiletu do Soulu se sama izolovala, protože se obávala nakažení virem H1N1. Dne 27. dubna kontaktovala místní úřad pro ochranu veřejného zdraví. Nákaza se u ní následně prokázala, ale protože příznaky byly mírné, nebyla hospitalizována, ale umístěna do karantény. Dne 5. května byla odhalena nákaza u další ženy, která nakaženou cestující vezla z letiště, mluvila s ní a vozila jí jídlo do její izolace. Cestujícím, kteří byly na palubě letadla s první nemocnou a seděli od ní 2 metry byli drženi v izolaci a bylo jim podáváno antivirotikum. Na palubě pak, vyjma nemocné, cestovalo celkem 338 osob, z nichž 124 pokračovalo dál a opustilo Koreu. Ze zbylého počtu 214 osob, včetně 23 členů posádky, se nepodařilo vypátrat 14 osob, viz Obrázek 3. U všech kontaktovaných osob se u čtyřech projeví příznaky respiračního onemocnění. Tři měli negativní RT-PCR test, u čtvrté cestující byla nákaza prokázána. Vzhledem k zjištěné cestovatelské anamnéze a pohybu této osoby před letem se zdá nepravděpodobné, že by se nakazila před samotným letem. Cestující si ani nevybavovala, že by v odletové hale před odletem byla v blízkosti osoby s první prokázanou nákazou. První nemocná seděla na místě 29J a druhá nemocná na sedadle 35H, viz obrázek. Vzdálenost mezi nimi byla 5 metrů. Ani jedna se z místa nepohybovala, kromě návštěvy toalety. První nemocná ji použila 3x a druhá 8x, použity byly všechny 4 přilehlé toalety. Ani jedna si nepamatovala které nebo kdy přesně. Let trval 13 hodin. [6]

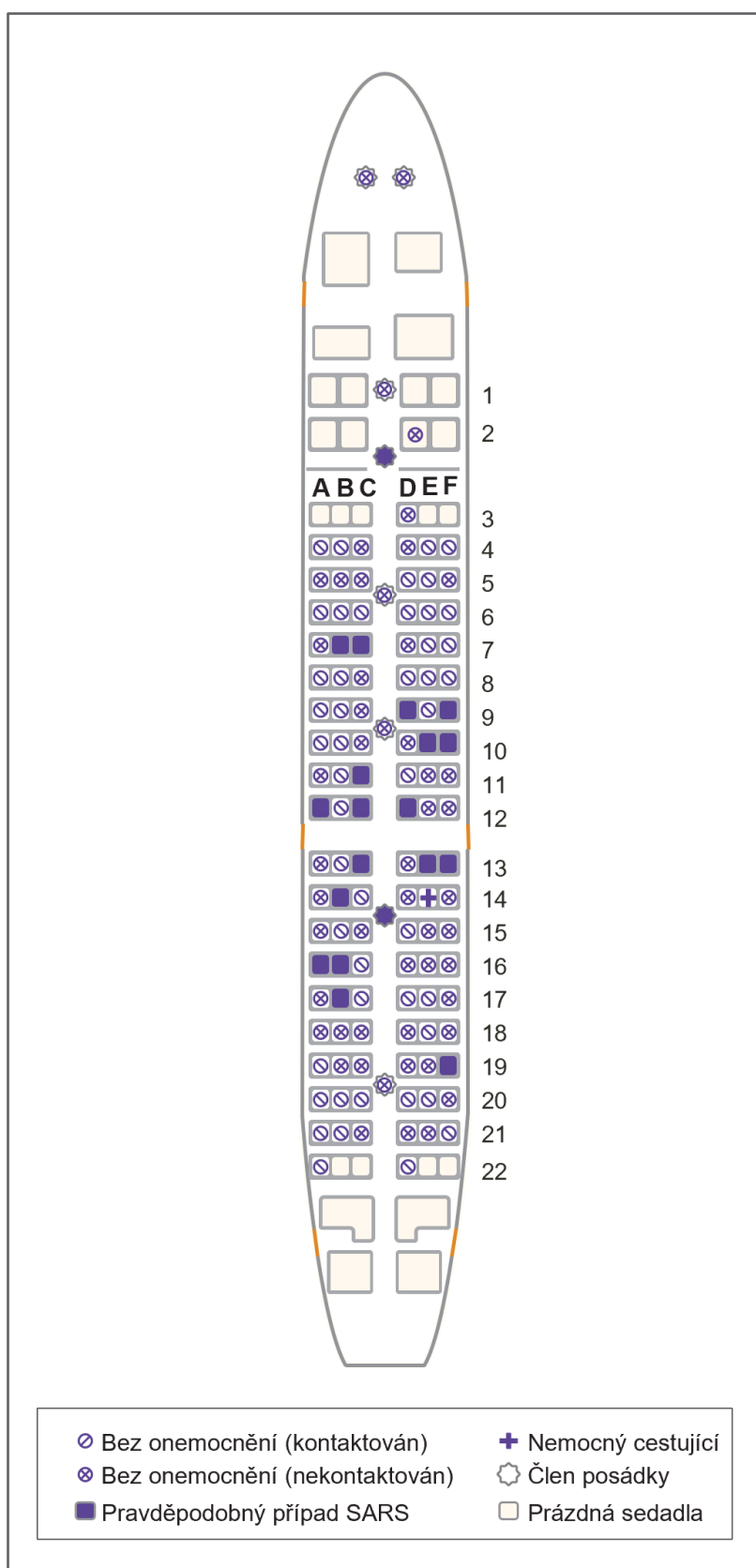
Obrázek 3 – Rozložení nemocných cestujících na letu Los Angeles – Soul [6]



4.1.3. Nákaza koronavirem SARS-CoV-1 na letu Hongkong - Peking

Dne 15. března 2003, při letu Boeing 737-300 se 120 osobami na palubě letících z Hongkongu do Pekingu došlo k šíření nemoci SARS-CoV-1 od symptomatického muže, který byl po příletu hospitalizován a jemuž byla nemoc laboratorně diagnostikována. U tohoto letu se podařilo kontaktovat 65 cestujících, a to do 8 dnů po příletu. U 18 z nich se pak postupně nemoc SARS projevila. Také se vyskytla podezření na onemocnění dalších 4 cestujících, kteří ale nebyli kontaktováni. Podle novinových zpráv byli dalšími nakaženými 2 letušky, jedna v sekci ekonomické třídy a druhá v sekci první třídy. Ve třech řadách před a za řadou s prvním symptomatickým cestujícím se nemoc projevila u 8 z 23 osob. Dalších 10 nakažených cestujících pak sedělo v jiných částech kabiny, tzn. že 56 % nakažených nesedělo v místech, ve kterých jsou osoby primárně označeny za kontakty dle postupů Mezinárodní zdravotnické organizace, viz Obrázek 4. V souvislosti se šířením onemocnění SARS pak byly vysledovány další lety s tím, že u třech, včetně výše uvedeného, docházelo s vysokou pravděpodobností k přenosu nákazy na palubách letadel. Let trval 3 hodiny. [7]

Obrázek 4 – Rozložení nemocných cestujících na letu Hongkong – Peking [7]



4.1.4. Velikost biologických agens

Pokud budeme jako jednu z možných cest přenosu uvažovat filtroventilaci, bude pro naše zkoumání rozhodná velikost biologických agens, kvůli prostupnosti póry filtrů, které jsou schopny zachycovat různě velké částice.

Všeobecné rozdělení biologických agens dle velikosti viz Tabulka 7.

Tabulka 7 – Velikost biologických agens (všeobecně) [8][9]

Název	Rozsah	Zástupce	Nemoc
Viry	20 – 300 nm	<i>Orthomyxoviridae</i> SARS-CoV-1	Chřipka SARS
Bakterie	0,2 – 10 μm	<i>Escherichia coli</i> <i>Mycobacterium tuberculosis</i> <i>Bacillus anthracis</i>	Diarrhea Tuberkulóza Anthrax
Mikroskopické houby	2 – 10 μm	<i>Candida albicans</i> <i>Aspergillus</i>	Infekce Aspergilózu
Paraziti	1 μm – jednotky metrů	<i>Plasmodium malariae</i> Tasemnice	Malárie Tennióza
Makroskopické houby	1 μm – stovky metrů	<i>Aspergillus</i> <i>Agaricomycetes</i>	Alergie Otravy

Velikosti vysoce nebezpečných nemocí (dále jen VNN), které definujeme jako:

- infekční onemocnění s rychlým šířením mezi lidmi;
- vysoká letalita (90 % a více);
- omezená včasná diagnostika a léčba.

viz Tabulka 8.

Tabulka 8 – Velikost agens VNN [10]

Název	Typ	Velikost	Nemoc	Šíření vzduchem
<i>Bacillus anthracis</i>	Bakterie	1-1.2 μm x 3-5 μm	Antrax	Ano
<i>Variola major</i>	Virus	200-300 nm	Pravé neštovice	Ano
<i>Ebolavirus</i>	Virus	80 nm	Ebola	Ne
<i>Yersinia pestis</i>	Bakterie	0.5-0.8 μm x 1-3 μm	Mor (pneumatická forma)	Ano

V letectví se dále můžeme setkat se šířením nemocí viz Tabulka 9.

Tabulka 9 – Velikost agens ostatních nemocí spojených s letectvím [11][12][13][14][15][16]

Název	Typ	Velikost	Nemoc	Šíření vzduchem
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Bakterie	2-4 μm	Tuberkulóza	Ano
<i>Morbillivirus</i>	Virus	100-250 nm	Spalničky	Ano
MERS-CoV	Virus	120-160 nm	MERS	Ano
<i>Norovirus</i>	Virus	25-32 nm	Gastroenteritida	Ne
<i>Orthomyxoviridae</i>	Virus	80-120 nm	Chřipka	Ano
SARS-CoV-1	Virus	120 nm	SARS	Ano
SARS-CoV-2	Virus	60-140 nm	COVID-19	Ano

4.1.5. Metoda určení kontaktů a šíření virů v kabině

Jak již bylo zmíněno v textu výše, téma disertace vzniklo na základě mého působení v pracovních skupinách, které se zabývaly stanovením metody určení kontaktů. Jako základní metoda předchází tzv. cestovatelské anamnéze, při které je šetřením orgánu ochrany veřejného zdraví zjišťováno, zda nebyly cestující vystaveni možnosti nákazy i mimo letadlo, byla určena metoda vycházející ze zkušeností se šířením tuberkulózy, jedné z prvních nemocí, které byly v rámci letecké dopravy sledovány. Tato metoda je převzata ze zahraničí a spočívá v určení prostoru, ve kterém dochází k přímému aerogennímu nakažení touto nemocí. Prostor je určen vzdáleností 1,5 metru od cestujících s příznaky. V praxi se pak pracuje s osobami sedícími dvě řady sedadel před a dvě řady sedadel za nakaženými cestujícími a dále s osobami, které sedí v řadě sedadel vedle nich. [17][18]

Bakterie *Mycobacterium tuberculosis*, jakožto původce plicní formy tuberkulózy, se velmi dobře přenáší vzduchem a v prostoru může být přítomen řádově i několik hodin poté, co jej zdroj nákazy opustí. Současně může být snadno vdechnut hluboko do plic a nemoc se tak může rozvíjet. [19][20]

Okruh s průměrem 1,5 m je tedy prostor, v rámci kterého je možný přímý přenos tuberkulózy. S nepřímým přenosem se u této metody neuvažuje. Nezohledňuje tedy v žádné případě možnost přenosu prostřednictvím vzduchotechniky. Můžeme tedy konstatovat, že ji lze efektivně využít v případě šíření nemocí způsobených bakteriemi s tím, že se nabízejí další možnosti jak její účinnost zvýšit. V případě nemoci virového původu je její použití sporné. [20]

Popsaná metoda byla také použita v případě zanesení viru H1N1 do Velké Británie, viz kapitola 4.1.1 Nákaza virem H1N1 na letu Cancún - Birmingham. Článek zkoumající vhodnost této metody konstatuje, že u cestujících, kteří seděli do dvou řad od infekční osoby nebylo zjištěno větší riziko nákazy, ve srovnání s těmi, kteří tam neseseděli. [5]

Další zdroje hovoří o tom, že riziko nákazy virem H1N1 od spolucestujících je vyšší o 1,4 % u těch, kteří seděli do dvou řad od infekčního cestujícího. V tomto případě se jednalo o třináctihodinový let z amerických Los Angeles do novozélandského Aucklandu s tím, že nebylo možné zpětně zjistit stav u více jak 57 % cestujících. Stejný zdroj uvádí, že po vyšetřování dvou letů v rámci Severní Ameriky, trvajících mezi 1,5 a 2,5 hodinami, bylo prokázáno riziko nákazy

o 3,0 % vyšší pro ty, kteří seděli do dvou řad od infekčního případu. [21]

V rámci tezí přecházejících této práci je popsána studie profesora Qingyan Chen z Purdueovy univerzity, která pracovala s matematickým modelem proudění vzduchu v trupu letadla B 767. Ze studie je zjevné, že pokud by filtroventilace nedokázala účinně filtrovat biologická agens, může dojít k přenosu nákazy mezi jednotlivými cestujícími touto cestou.

Další zdroje pak uvádějí, že přenos infekce během letu může probíhat několika způsoby:

- přímý kontakt s infekčním sekretem nebo tělními tekutinami;
- povrchy kontaminovanými kapénkami;
- vdechnutím aerosolů. [22][23][24]

4.2. Systém filtroventilace letadel

Na úvod této kapitoly je potřeba definovat několik pojmů, které nás budou provázet i dále v textu:

- **Letadlo** – Zařízení schopné vyvozovat síly nesoucí jej v atmosféře z reakcí vzduchu, které nejsou reakcemi vůči zemskému povrchu. Jedná se tedy o všeobecný název, pod který se dají zařadit všechny stroje, které umí létat a jejich základní dělení je na letadla těžší než vzduch a letadla lehčí než vzduch. [25]
- **Letoun** – Letadlo těžší než vzduch s pohonem vyvozující vztlak za letu hlavně z aerodynamických sil na plochách, které za daných podmínek letu zůstávají vůči letadlu nepohyblivé. Tzn. že vztlak na křídlech nevzniká, na rozdíl od rotorových letadel (křídla rotují) a křidelníků (křídla mávají), jejich pohybem. [25]
- **Filtroventilace** – Pojem definovaný v rámci této práce. Jedná se o systém letounu, který zahrnuje distribuci vzduchu do a z kabiny letounu.
- **Klimatizační jednotka** – Jedná se o zařízení, které je součástí filtroventilace a má za úkol vzduch distribuovaný do kabiny tepelně a tlakově upravovat, více viz níže.

V rámci práce se budeme dále zabývat pouze nejběžnější se vyskytujícími sériově vyráběnými

letouny pro civilní letectví.

Tři společnosti s největším podílem na trhu s civilními letouny jsou evropský Airbus SE (dále jen Airbus), americký The Boeing Company (dále jen Boeing) a brazilská Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. (dále jen Embraer). Dle údajů těchto společností jsou nejčastěji vyráběné letouny tzv. úzkotrupé, tj. s jednou uličkou. [26][27][29][30][31]

U Airbus se jedná o letouny s označením A 320 family zahrnující typy A 318, 319, 320, 321. K datu 5. února 2025 bylo vyrobeno 11 865 kusů této řady, oproti druhé nejlépe prodávané výrobní řadě tohoto výrobce, již je letounů A 330, kterých bylo vyrobeno 1 499 kusů. Tento typ je širokotrupý, tzn. že má více než jednu uličku. [26][27][28]

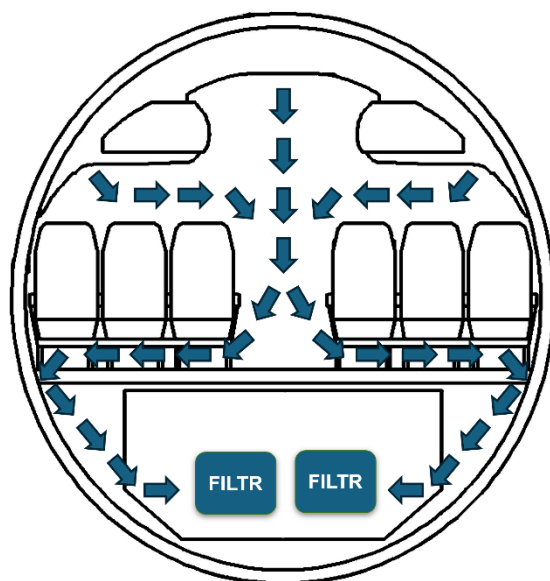
Výrobce Boeing pak vykazuje největší prodej u modelové řady letounů B 737. Ke konci prosince 2024 uvádí produkci 11 925 kusů oproti 1 161 vyrobených kusů druhé nejprodávanější modelové řady tohoto výrobce B 777, která je širokotrupá. [29]

Společnost Embraer má největší produkci letadel s označením E-JETS, které zahrnuje typy E 170, E 175, E 190 a E 195 a to 1 702 kusů k začátku roku 2025. Jedná se také o úzkotrupé letouny. [30][31]

Tato práce se tedy bude dále zaměřovat na úzkotrupé letouny modelových řad A 320 family a B 737.

U obou uvedených typů letounů je filtroventilační systém principiálně stejný. To znamená, že je částečně uzavřený, kdy je do recirkulujícího vzduchu přimícháván vzduch z vnějšího prostředí. Poměr míchání je od výrobců nastaven na 50 %, ale může být změněn na základě požadavku provozovatele letounu. V principu vše funguje tak, že je venkovní vzduch nasáván přes motory pomocí jejich kompresorů. Tento vzduch je velmi horký, má teplotu okolo 200-300°C, proto je potřeba jej zchladit v teplotních výměnících. Dále je potřeba upravit jeho tlak. Následně je vzduch distribuován do směšovací jednotky letounu, kam je přes HEPA filtry také přiváděn vzduch z kabiny, který je vytlačován do nákladového prostoru, viz Obrázek 5.

Obrázek 5 – Schéma distribuce vzduchu v letounech



Zde vzniklá směs putuje skrze vzduchové vedení do kabiny průduchy nad sedadly a je odváděna otvory umístěnými blízko podlahy. Část vzduchu letoun zcela opouští, viz dále. [32][33][34][42]

Ve zmíněných letounech je distribuce vzduchu s největším prouděním v oblasti úst, kdy je proud vzduchu proudící do kabiny laminární. Cirkulace vzduchu je pak provedena tak, aby rozdělila trup na různé sekce. U uvažovaných letounů se jedná v podélné ose o tři oddíly:

- pilotní kabinu, viz Obrázek 6, č. 1;
- přední část kabiny cestujících, viz Obrázek 6, č. 2;
- zadní část kabiny cestujících, viz Obrázek 6, č. 3.

Obvyklá rychlost proudění vzduchu v kabině se pohybuje mezi 0,05 m/s (0,18 km/h) a 0,3 m/s (1,08 km/h). Schéma filtroventilačního systému viz Obrázek 6. [32][33][34][42]

Celý systém je v principu bezúdržbový vyjma nařízených pravidelných kontrol a výměny HEPA filtrů. Ty se většinou mění při tzv. těžké údržbě, což je důkladná kontrola a údržba letounu, která se obvykle provádí v intervalu 18 – 24 měsíců. Během této údržby se letoun podrobí rozsáhlým kontrolám a opravám, které zahrnují demontáž velké části letounu a

Obrázek 6 – Schéma filtroventilačního systému letounů



32

- regulaci teploty;
- regulaci vlhkosti vzduchu;
- dostatečnou distribuci vzduchu do kabiny;
- tlakování kabiny. [35][36][37][38][39]

To má zajistit podmínky nejenom pro přežití cestujících a posádky, ale také pro jejich dostatečné pohodlí. [35][37]

Aby se toho dosáhlo, je nutné dodávat vzduch do kabiny v množství cca 0,0094 m³/s (9,4 dm³/s) na cestujícího, kdy je polovina tohoto množství tvořena recirkulací vzduchu z kabiny. Množství přísávaného vzduchu vně letounu je tedy cca 0,0047 m³/s (4,7 dm³/s) na cestujícího a stejné množství vzduchu je pak vypouštěno z letounu, a to aby nedošlo k poškození trupu letounu přetlakem. Proto jsou letouny vybaveny pojistným přetlakovým ventilem v zadní části, viz Obrázek 7. [40][41]

Obrázek 7 – Přetlakové ventily u letounů A 320 family



Proud distribuovaného vzduchu, určený tlakem v kabině, závisí na letovém režimu. Konkrétně na tom, zda letoun stoupá, letí rovně v letové hladině nebo klesá. Důvodem jsou rozdílné výšky a tím i různé vnější tlaky a je žádoucí udržovat tlak v kabině co nejblíže tlaku na úrovni hladiny moře. Konstrukční omezení ale toto neumožňují, proto je primárním účelem ECS udržovat tlak v kabině mezi 101 000 Pa a 75 000 Pa, tj. tlak, který se vyskytuje přibližně ve

výšce 2 500 m n. m. [37][40][41]

Teplota na palubě letounů je udržována mezi 20 a 24 °C. [35]

Co se vlhkosti týče, tak ta je spíše nízká. Je to dáno vysoušením vzduchu v rámci jeho přípravy pro distribuci v kabině, viz kapitoly 4.2.2 Systém filtroventilace v letounu A 320 a 4.2.3 Systém filtroventilace v letounu B 737. Vlhkost by se měla pohybovat mezi 10 – 20 %. [35]

Pokud by došlo k výpadku elektrického proudu nebo jiné závadě, která by neumožňovala normální fungování filtroventilace v letounu, je systém osazen tzv. Ram Air Turbine (dále jen RAM). Jedná se o zařízení, turbínu, umístěnou v kanále, kterým obtéká vzduch vně letounu a která po aktivaci začne dodávat elektřinu a vzduch pro tento systém. [32][33][34][42]

4.2.2. Systém filtroventilace v letounu A 320 family

První letoun s typovým označením A 320 byl vyroben v roce 1988 a z něj byly odvozeny další modely A 318 a A 319 (krátké varianty A 320) a A 321 (dlouhá varianta A 320). Ve všech modelech je pak výměna vzduchu řešena stejně. [32][44]

Jak je uvedeno výše, vzduch pro filtroventilační systém letounů A 320 family je nasáván z vnějšku letounu a to přes motory. V případě, že nejsou motory v chodu, dodává vzduch tzv. pomocná energetická jednotka Auxiliary Power Unit (dále jen APU), která je umístěna v ocase letounu, viz Obrázek 10. Protože je našim cílem sledovat letoun za letu, budeme popisovat stav, kdy vzduch přichází od motorů. Ten je velmi horký a putuje do dvou nezávislých klimatizačních jednotek, které jsou umístěny ve spodní části letounu mezi hlavními podvozky. Tato část není tlakována a není prostorově spojena s nákladovým prostorem. V případě závady jedné jednotky ji dokáže druhá zcela zastoupit a dodávat vzduch do celého letounu. [45][46]

Součástí motorů jsou vysokotlaké kompresory (část turbíny motoru před spalovací komorou), které stlačují vnější vzduch, čímž jej mimo jiné výrazně ohřívají. Takto stlačený vzduch je distribuován do letounu a označuje se všeobecným termínem Bleed Air. U letounů A320 family slouží tento vzduch:

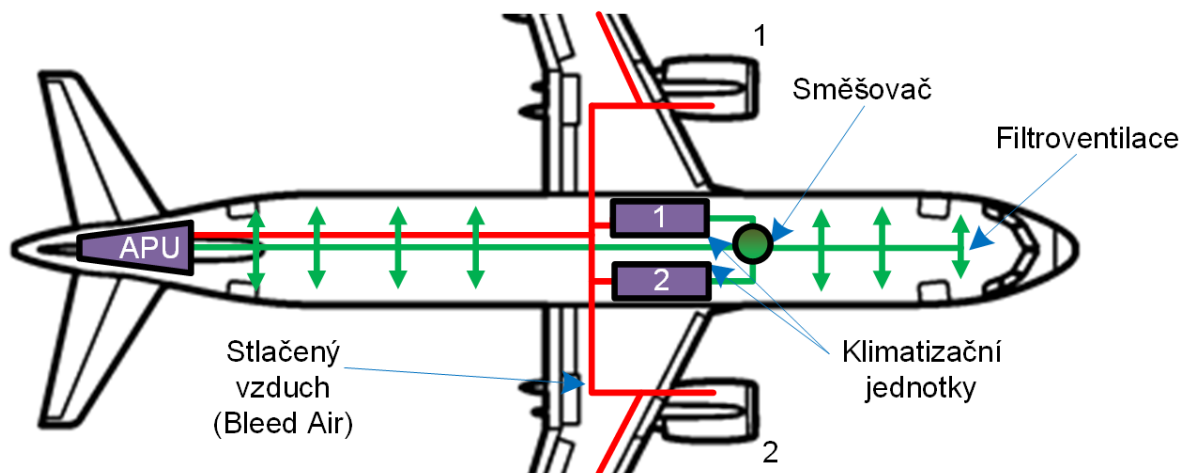
- pro filtroventilaci, tj. výměnu vzduchu v kabině včetně jejího tlakování;
- pro odmrazování některých vnějších částí letounu, např. hrany křídel;

- jako médium pro pneumatické systémy;
- pro startování motorů (pro první motor se používá vzduch z APU, které funguje na stejném principu jako hlavní motory, tj. jedná se o proudový motor);
- tlakování vodních systémů pro toalety a kuchyňské zařízení. [47][48][49]

Předmětem této práce je filtroventilace, takže se budeme dále soustředit na ní.

Klimatizační jednotky jsou označeny jako jednotka (Pack) 1 a 2 s tím, že si každá jednotka bere vzduch od motoru s příslušným číslem (číslováno z leva doprava), viz Obrázek 8 a Obrázek 9.

Obrázek 8 – Schéma vedení Bleed Air u A 320 family (zaměřeno na filtroventilaci)



Obrázek 9 – Poloha klimatizačních jednotek u A 320

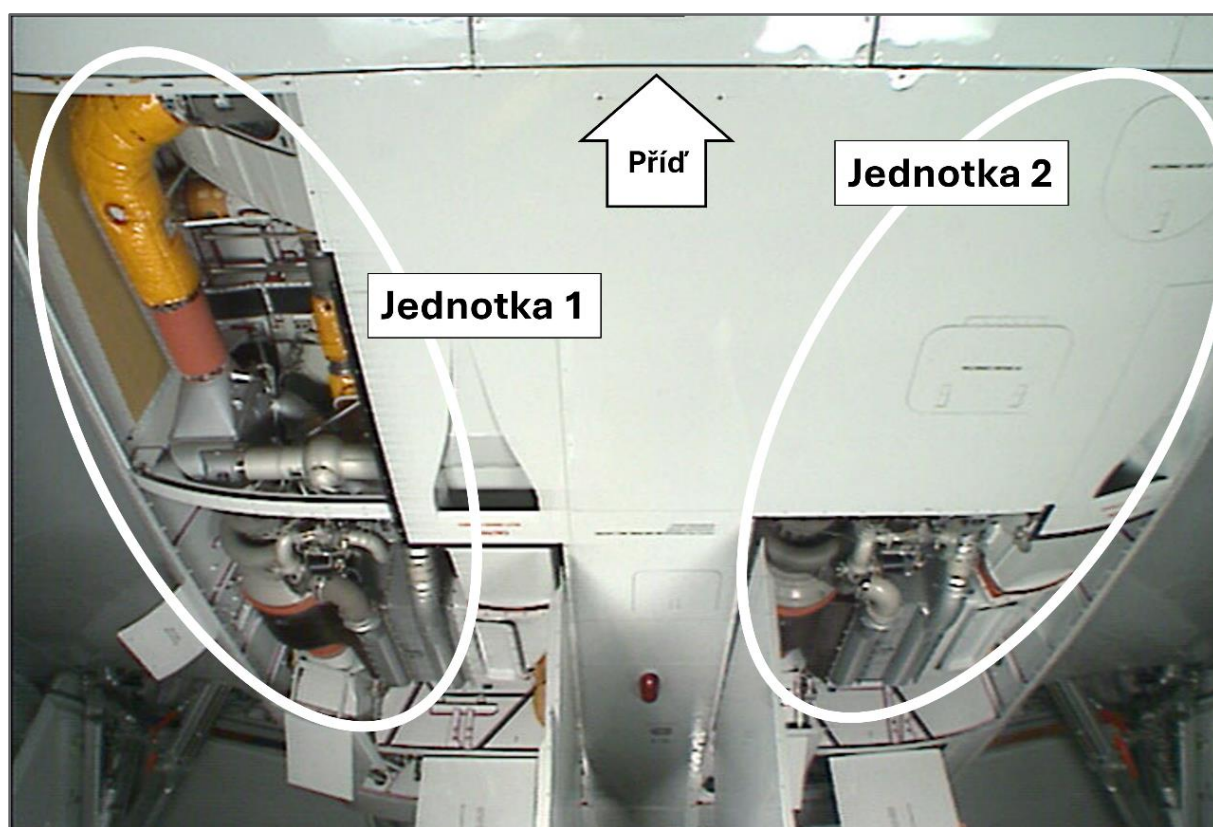


Schéma a fotografie klimatizační jednotky viz Obrázek 10 a Obrázek 11.

Stlačený horký vzduch pokračuje od motorů ke klimatizačním jednotkám. Před nimi je umístěn distribuční ventil (viz Obrázek 10, č. 1), který může uzavřít přístup vzduchu do jednotky. Každá jednotka má svůj vlastní ventil. Za tímto ventilem je rozdělení vzduchového vedení na větev, určenou pro systémy stabilizace letounu (ta ke klimatizační jednotce nepatří), a dále na větev, která je určena k ochlazení a větev, jež je určena pro zahřívání vzduchu (tyto jsou již součástí klimatizační jednotky). [50][51][52][53]

Nyní budeme postupovat po části s chlazením vzduchu. Zde je první zařízením výměník tepla (viz Obrázek 10 a Obrázek 11, č. 2). Ten ochlazuje příchozí vzduch pomocí vzduchu omývajícího trup letounu, který je k němu přiveden kanálem v trupu letounu. Snížením teploty dojde k poklesu tlaku vzduchu. Kvůli tomu je za výměníkem zařazen kompresor (viz Obrázek 10 a Obrázek 11, č. 3). Ten opět zvedne teplotu vzduchu, takže je potřeba jej znovu zchladit. Následuje tedy druhý výměník tepla (viz Obrázek 10 a Obrázek 11, č. 4), opět chlazený pomocí vzduchu omývajícího trup, stejně jako v prvním případě. [50][51][52][53]

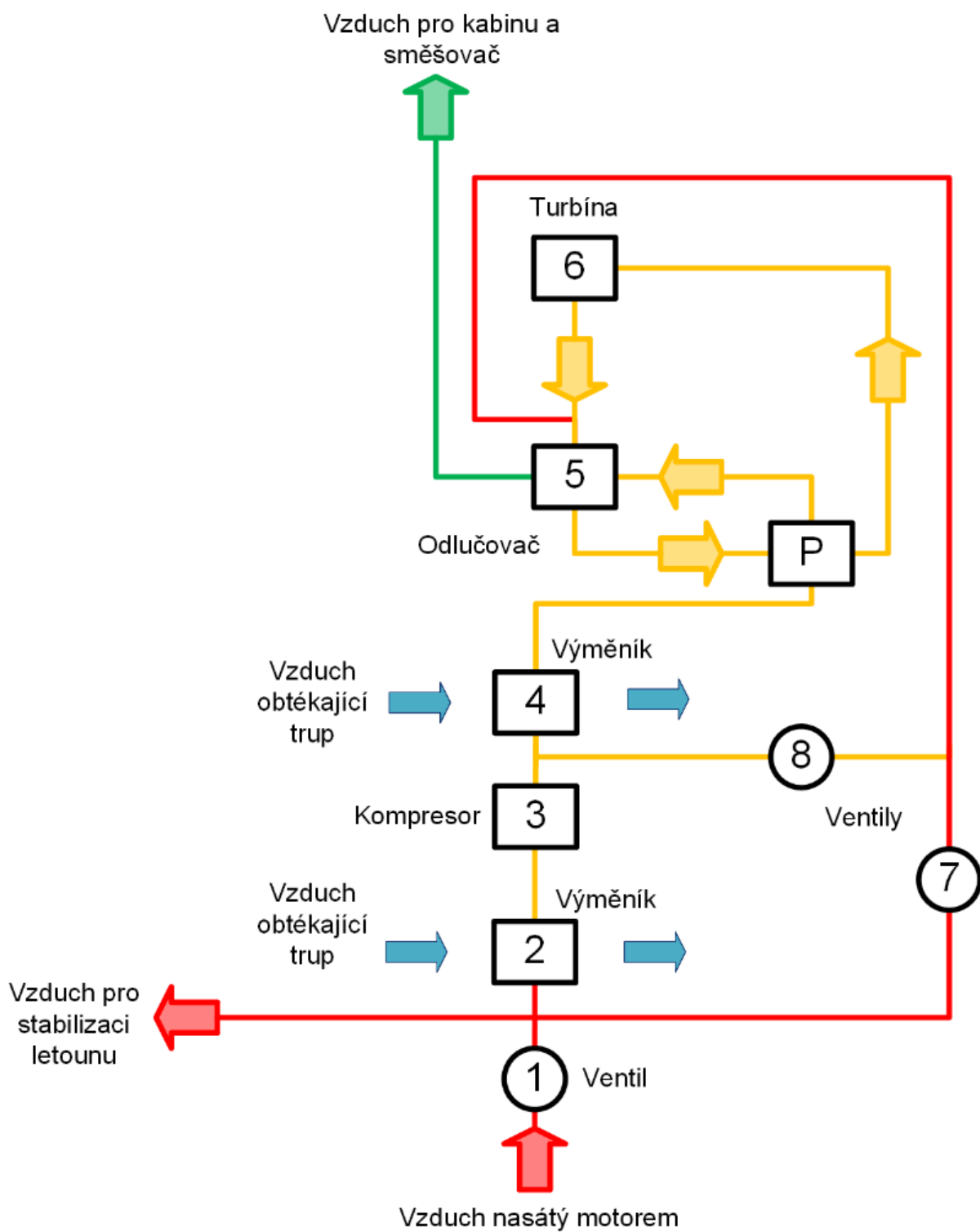
Před tímto výměníkem je ještě umístěno rozbočení vzduchu s vlastním ventilem (viz Obrázek 10, č. 8) napojené do větve s teplým vzduchem. Jedná se o pojistku pro případ, že by byl vzduchu nasávaný kompresory motoru příliš studený nebo by měl příliš nízký tlak. V rámci ochlazovací větve je tlak i teplota vzduchu zvedána v kompresoru. U větve teplého vzduchu takové zařízení zařazeno není. Proto je suplováno tímto odbočením. Za běžných provozních podmínek tato větev zůstává zavřená. [50][51][52][53]

Za kompresorem je tedy zařazen druhý výměník, který vzduch ochladí. Aby ale nebyl ochlazen příliš, respektive aby se jeho teplota držela na rosném bodu, následuje tzv. přehříváč (viz Obrázek 10 a Obrázek 11, písmeno „P“). Vzduch nyní začne cirkulovat v okruhu pro extrakci vody. Ten obsahuje nejdříve odlučovač (viz Obrázek 10, písmeno 5) s extraktorem vysrážené vody. Ta je vstřikována do výdechové částí kanálů, kterými je veden vzduch obtékající letoun pro výměníky. Vzduch se vrací do přehříváče a vede do poslední části klimatizační jednotky, kterou je expanzní turbína (viz Obrázek 10 a Obrázek 11, č. 6). To je zařízení ve kterém se může vzduch expandovat. [50][51][52][53]

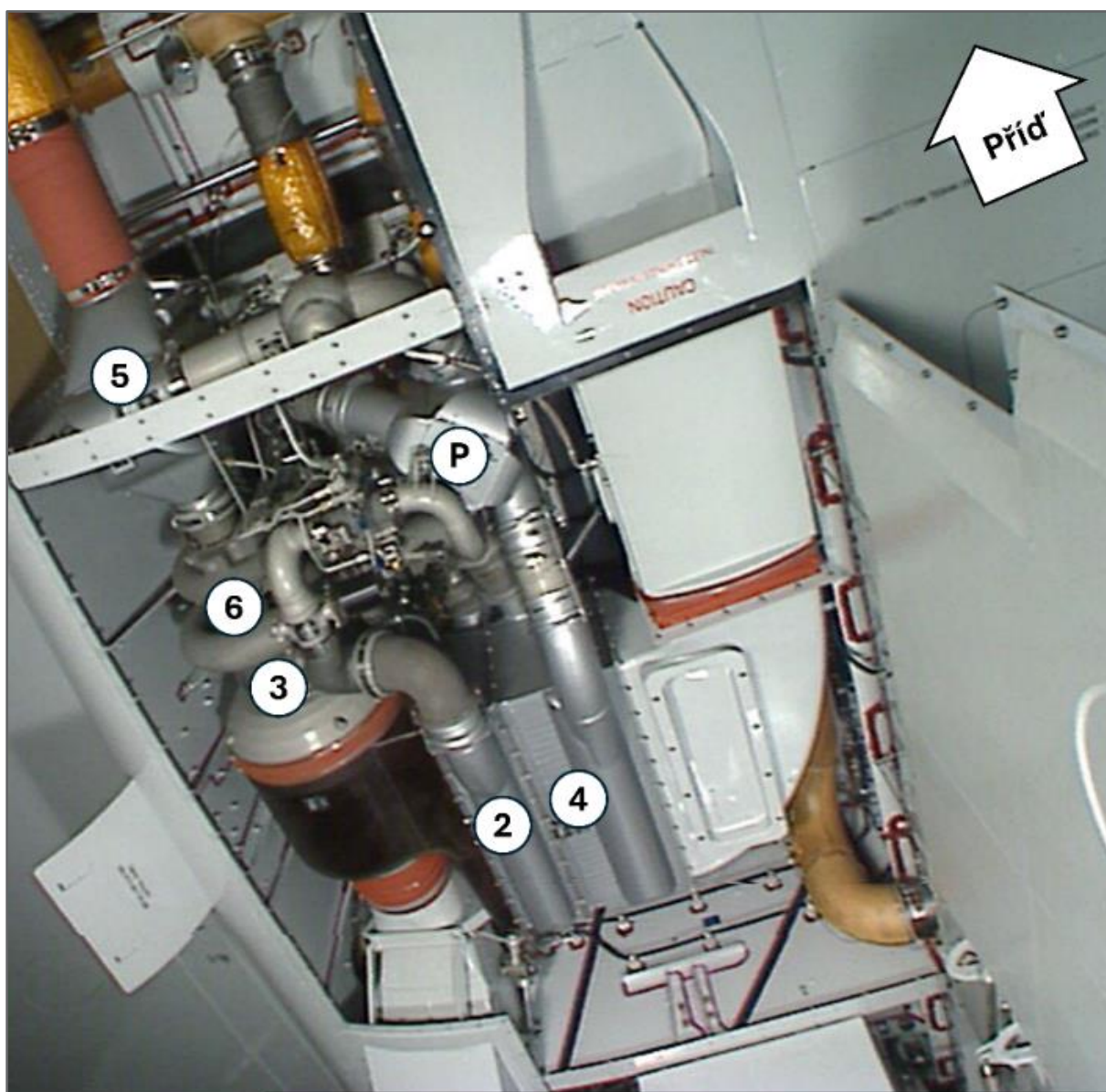
Zde se k němu připojuje větev s neupraveným teplým vzduchem. Tato větev je osazena uzavíratelným směšovacím ventilem (viz Obrázek 10, č. 7). Teplý vzduch se tedy přiměšuje k ochlazenému vzduchu, čímž se docílí požadované teploty pro směšovač letounu. Při tomto míšení, a po expanzi z turbíny, může dojít ještě ke srážení vody a proto jde vzduch již naposledy do odlučovače. [50][51][53][54]

Distribuční i směšovací ventil, stejně jako přísun vzduchu obtékající trup letounu pro výměníky tepla, jsou řízeny elektronicky podle nastavené požadované výsledné teploty (viz ECS 4.2 Systém filtroventilace letadel). Celý systém je pak ještě o něco komplikovanější než bylo popsáno, protože obsahuje pojistky proti různým stavům a změnám. Výsledkem je ale vždy to, že do směšovací jednotky letounu ústí vzduch z jeho vnějšku. Popis je tedy dostačující pro potřeby této studie. [50][51][53]

Obrázek 10 – Schéma klimatizační jednotky u A 320 family

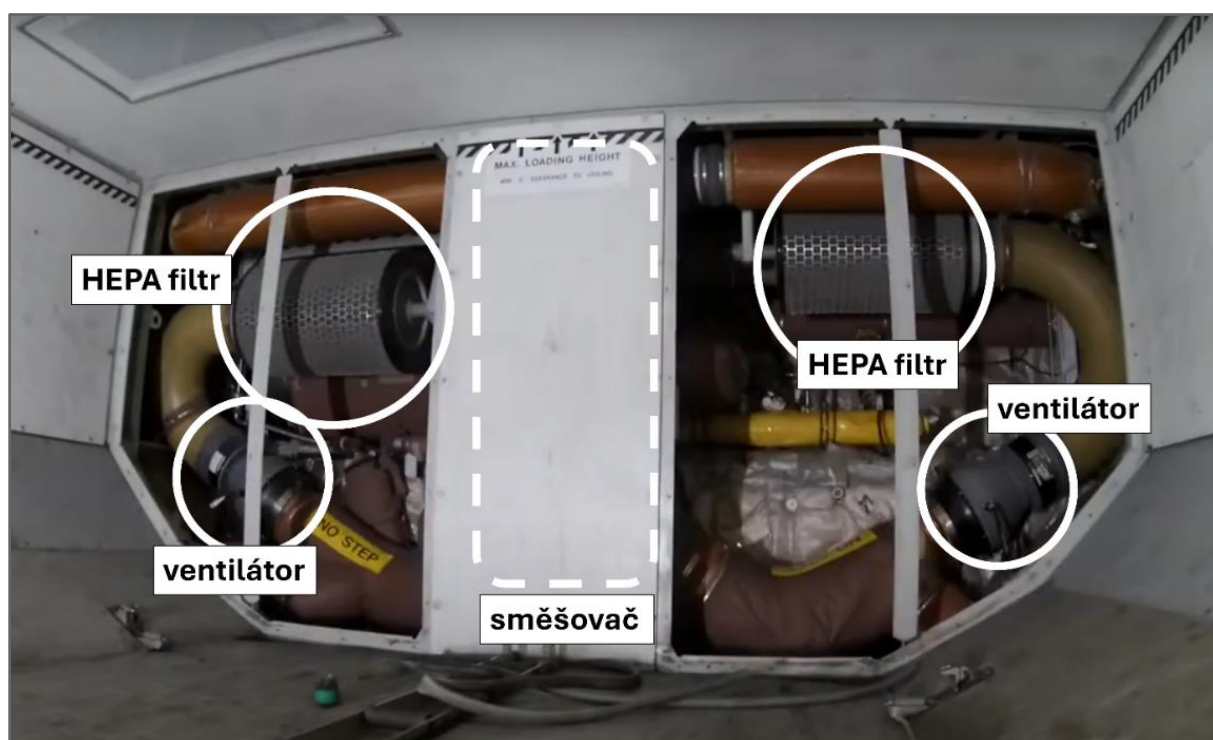


Obrázek 11 – Fotografie klimatizační jednotky 1 u A 320



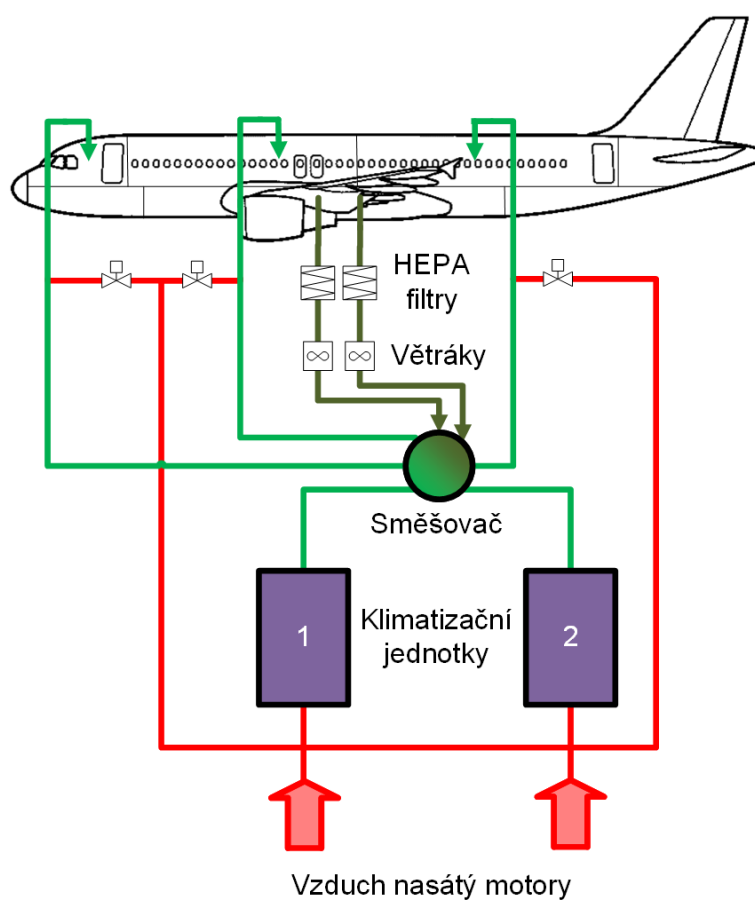
Vzduch z obou klimatizačních jednotek tedy pokračuje do směšovače letounu, viz Obrázek 12 a Obrázek 13, kde je míchán se vzduchem z paluby letounu. Takto smíchaný vzduch je dále distribuován ke stropu jednotlivých sekcí v kabině, odkud padá do nákladového prostoru, odkud je odsáván za pomoci dvou ventilátorů do směšovací jednotky. Tato dvojice ventilátorů je umístěna blízko u sebe, pod podlahou kabiny cestujících, v prostoru mezi předním a zadním nákladovým prostorem a je osazena dvěma HEPA filtry, viz Obrázek 12 a Obrázek 13. [50][51][53]

Obrázek 12 – Umístění HEPA filtrů a směšovače v A 320



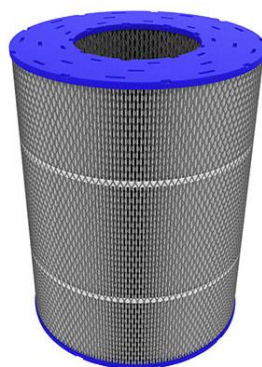
Kvůli možnosti většího teplotního rozsahu je vzduchové vedení, jdoucí od směšovače letounu, doplněno vedením teplého vzduchu od motorů s distribučními ventily. Do vzduchu ze směšovače letounu tak lze přidávat teplý vzduch vyvedený ještě před klimatizačními jednotkami, viz Obrázek 13. [50][51][53]

Obrázek 13 – Systém filtroventilace v A 320 family



HEPA filtry pro letouny A 320 family mají tvar dutého válce, viz Obrázek 14, HEPA filtr od společnosti Donaldson Company.

Obrázek 14 – HEPA filtr pro A 320 family (Donaldson Company) [54]



Bylo dohledáno, že HEPA filtry pro letouny A 320 family vyrábí společnosti:

- Donaldson Company;
- Pall Corporation.

Tabulka 10 pak uvádí konkrétní vlastnosti filtrů deklarované výrobcí.

Tabulka 10 – Filtry pro A 320 family a jejich výrobcem deklarovaná záchytnost [54][55][56][57][58][59]

Výrobce	Donaldson Company		Pall Corporation	
Výrobní číslo	P639205	424b200-6	QA06423-01	QB0654-01
HEPA filtr	ano	ano	ano	Ano
Účinnost pro částice [%]	99,97 (3 µm)	99,99 (3 µm)	99,99 (NaCl)	99,99 (NaCl)
Doporučená výměna [h]	5 000	4 000	5 000	5 000
Prach	Ano	Ano	Ano	Ano
Bakterie	Ano	Ano	Ano	Ano
Viry	Ano	Ano	Ano	Ano
Těkavé organické sloučeniny	Ano	Ano	Ne	Ano

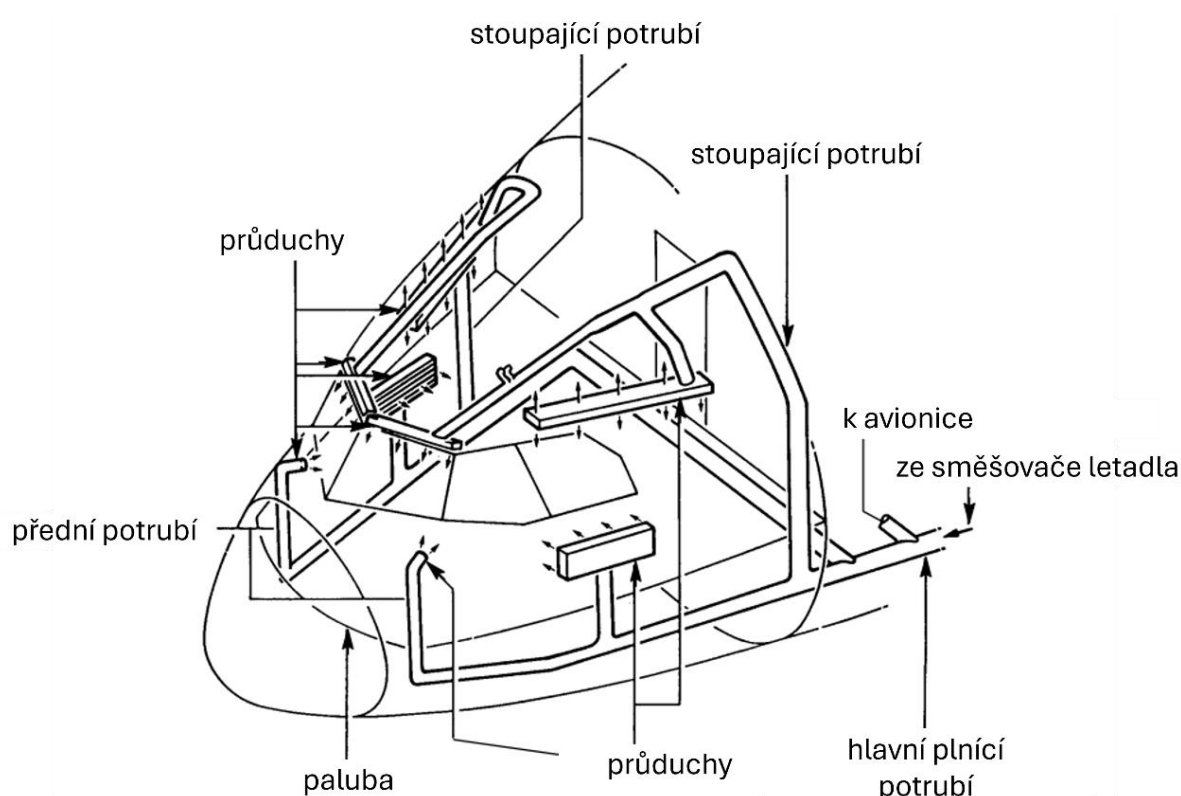
Samotnou distribuci vzduchu ze směšovače letounu na palubu letounu můžeme rozdělit na distribuci do pilotní kabiny a na distribuci do kabiny cestujících. V obou případech je vzduch ze směšovače letounu nejdříve distribuován v širokých vzduchových trubkách. [34][46]

V případě pilotní kabiny se tak děje širokou trubicou nainstalovanou pod levou stranou podlahy kabiny. Na tuto se napojují tenčí stoupající vzduchové trubky, které ústí:

- na levé straně stanoviště velitele letounu;
- na pravé straně stanoviště prvního důstojníka;
- na dvou místech v levé části stropu nad stanovištěm třetího člena posádky, např. instruktora (pokud je osazeno). [34][46]

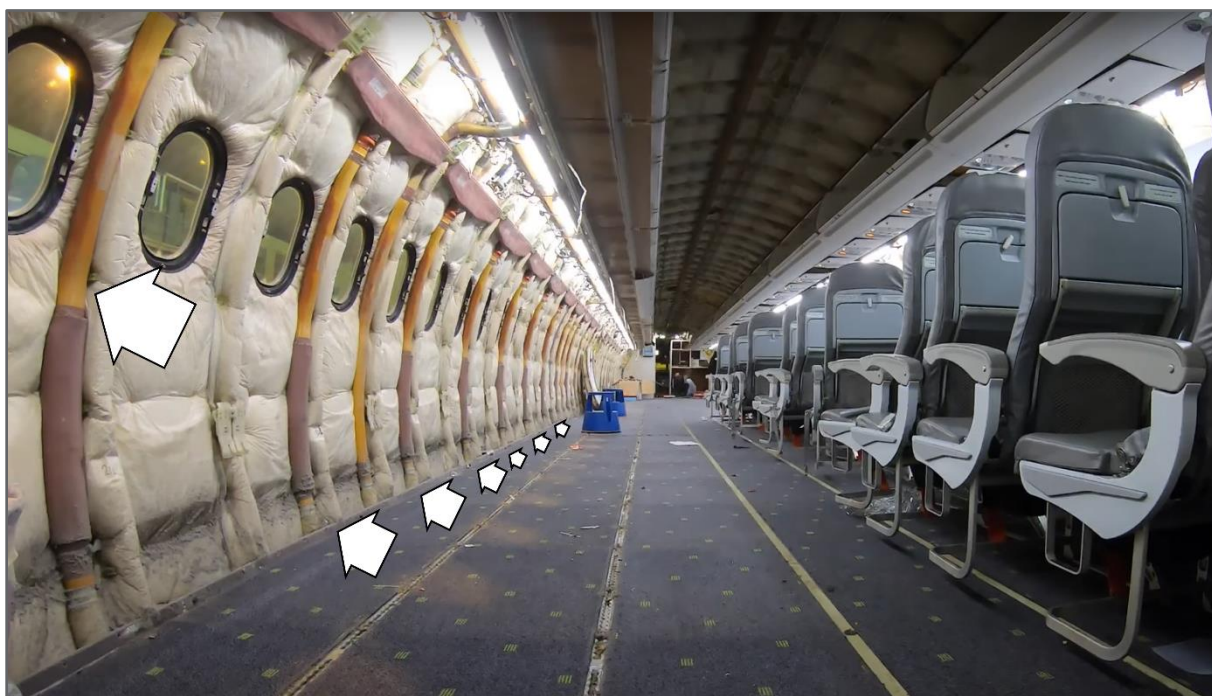
Schéma viz Obrázek 13.

Obrázek 15 – Distribuce vzduchu do pilotní kabiny letounu A 320 family

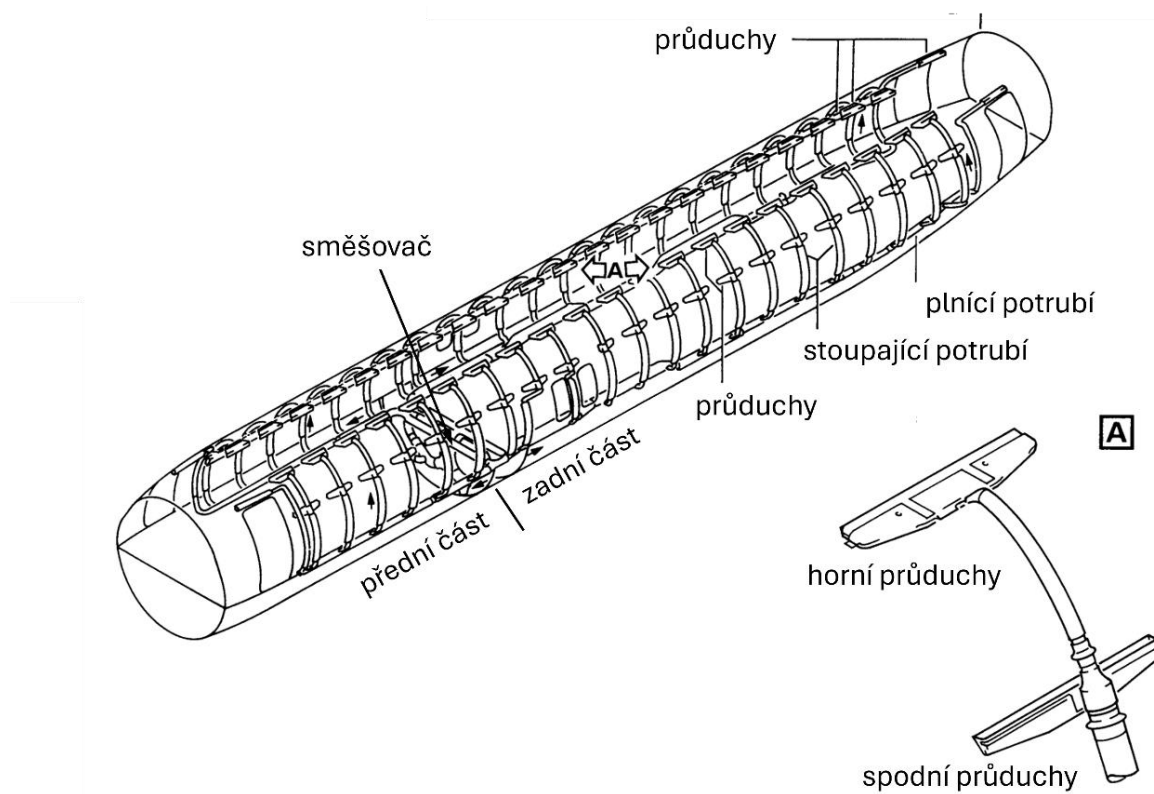


Distribuce vzduchu do kabiny cestujících je také zajištěna širokými distribučními trubkami, nainstalovanými pro podlahou. Ty dodávají vzduch do přední a zadní části kabiny. Na ně jsou mezi každým druhým oknem (začínající mezi prvním a druhým oknem, viz Obrázek 16) nainstalovány tenčí stoupající trubky. Na nich jsou umístěny průduchy a to vždy jeden nad a jeden pod úložným prostorem pro zavazadla. Ten pod úložným prostorem je možné směrově a kapacitně ovládat cestujícími. Vzduch je také distribuován nad přední a zadní dveře. Schéma viz Obrázek 17. [34][46]

Obrázek 16 – Detail umístění distribučních trubek u A 320



Obrázek 17 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu A 320 family



Aby informace o distribuci vzduchu v letounech A 320 family byla kompletní, je potřeba zmínit ještě chlazení a větrání technologických částí, jako jsou avionika, řídicí panely, baterie, toalety, kuchyňky apod. Ta se děje přes samostatné ventilační systémy, které jsou určeny:

- pro avioniku, zahrnující jak zařízení v kabině, tak mimo ni, a baterie;
- toalety a kuchyňky;
- nákladový prostor.

Systém určený pro avioniku funguje tak, že od ní odsává vzduch pomocí dvou ventilátorů, které spínají okamžitě po aktivování elektrické energie na letounu. Tento vzduch je hnán do nákladového prostoru a zahřívá jej. V případě, že je teplota příliš vysoká (např. vlivem vnějšího prostředí), může být vypuštěn mimo letoun skrze ventily. K vypouštění dochází přes vyústění na přední části trupu. Toto nastavení systému se dá také použít pro odvod kouře v případě zahoření. [34][46]

Ventilace pro toalety a kuchyňky slouží především proto, aby se kabinou nešířily nepříjemné pachy. K odsávání dochází u stropu a to pomocí jednoho ventilátoru, který je umístěn na konci tohoto vzduchového vedení. To se táhne celou kabinou a kopíruje ji. Odsátý vzduch je vyfukován mimo letoun. [34][46]

K odvětrání nákladového prostoru slouží jeden ventilátor. Tento systém se dá také použít pro odvětrání kouře. Vzduch je vypouštěn z letounu. [34][46]

4.2.3. Systém filtroventilace v letounu B 737

První letoun modelové řady B 737 byl vyroben roku 1967. Od této doby vzniklo mnoho modifikací a i když je princip fungování filtroventilace na všech typech stejný, vyskytují se v jejím provedení rozdíly. Pro tuto práci je pak nejdůležitější počet HEPA filtrů, kterými je letoun osazen a varianta trupu, daná počtem cestujících, která ovlivňuje způsob distribuce vzduchu do kabiny. Přehled jednotlivých typů viz Tabulka 11 a Tabulka 12. [60][61]

Tabulka 11 – Modely letounů B 737 s jedním HEPA filtrem [61][62][63][64]

Model	Rok poslední produkce	Výrobní status	Varianta trupu
737-100	1969	Ukončen	Krátká
737-200	1988	Ukončen	Krátká
737-300	1999	Ukončen	Dlouhá
737-500	1999	Ukončen	Krátká
737-600 (NG)	2006	Ukončen	Krátká
737-700 (NG)	2020	Ukončen	Krátká

Tabulka 12 – Modely letounů B 737 se dvěma HEPA [61][62][63][64]

Model	Rok poslední produkce	Výrobní status	Varianta trupu
737-400	2000	Ukončen	dlouhá
737-800 (NG)	2020	Ukončen	dlouhá
737-900 (NG)	2020	Ukončen	dlouhá
737 MAX 7	Ve výrobě	Aktivní	Krátká
737 MAX 8	Ve výrobě	Aktivní	dlouhá
737 MAX 9	Ve výrobě	Aktivní	dlouhá
737 MAX 10	Ve výrobě	Aktivní	dlouhá

I když není vyloučené, že jsou stále provozovány typy s jedním HEPA filtrem, bude se práce dále zaměřovat na letouny B 737 se dvěma HEPA filtry. Důvodem je nejen jejich větší výskyt, ale také předpoklad, že se tento trend bude dále ve výrobě držet.

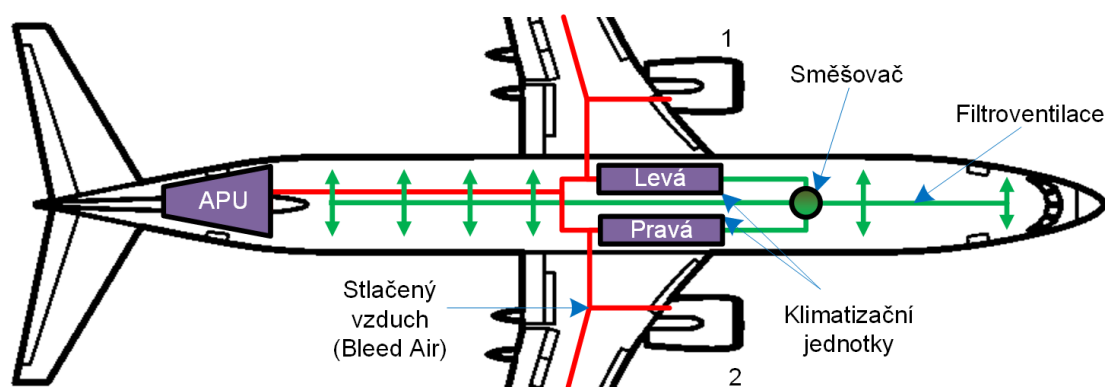
Jak již bylo uvedeno výše, je filtroventilační systém letounů A 320 family a Boeing 737 principiálně stejný, ale liší se v technologickém provedení.

U letounů Boeing 737 se opět vzduch nasává za letu z vnějšího prostředí pomocí motorů. Pokud jsou motory vypnuté, a letoun není napojeno na externí zdroj vzduchu, nasává vzduch APU. Tato je umístěna v ocasní části trupu, viz Obrázek 18. My se opět budeme soustředit na letoun za letu. V tomto stavu používají letouny B 737, stejně jako letouny A 320 family, dvě větve nasávání vzduchu z vnějšku, které vedou do dvou klimatizačních jednotek. Stejně jako u letounů A 320 family dokáže jenom jedna jednotka zásobovat vzduchem celou kabinu. [65][34]

Nejdříve tedy vzduch vstupuje do kompresorové části motoru, která je před spalovací komorou motoru. Stlačením se vzduch ohřeje a je odebírán ke stejným účelům jako u letounů A 320 family, viz kapitola 4.2.2 Systém filtroventilace v letounu A 320. [34]

Vzhledem k tématu práce se opět budeme soustředit na filtroventilaci. Vzduch tedy postupuje dále do klimatizačních jednotek, viz Obrázek 18, které jsou vybaveny ECS.

Obrázek 18 – Schéma vedení Bleed Air u B 737 (zaměřeno na filtroventilaci)



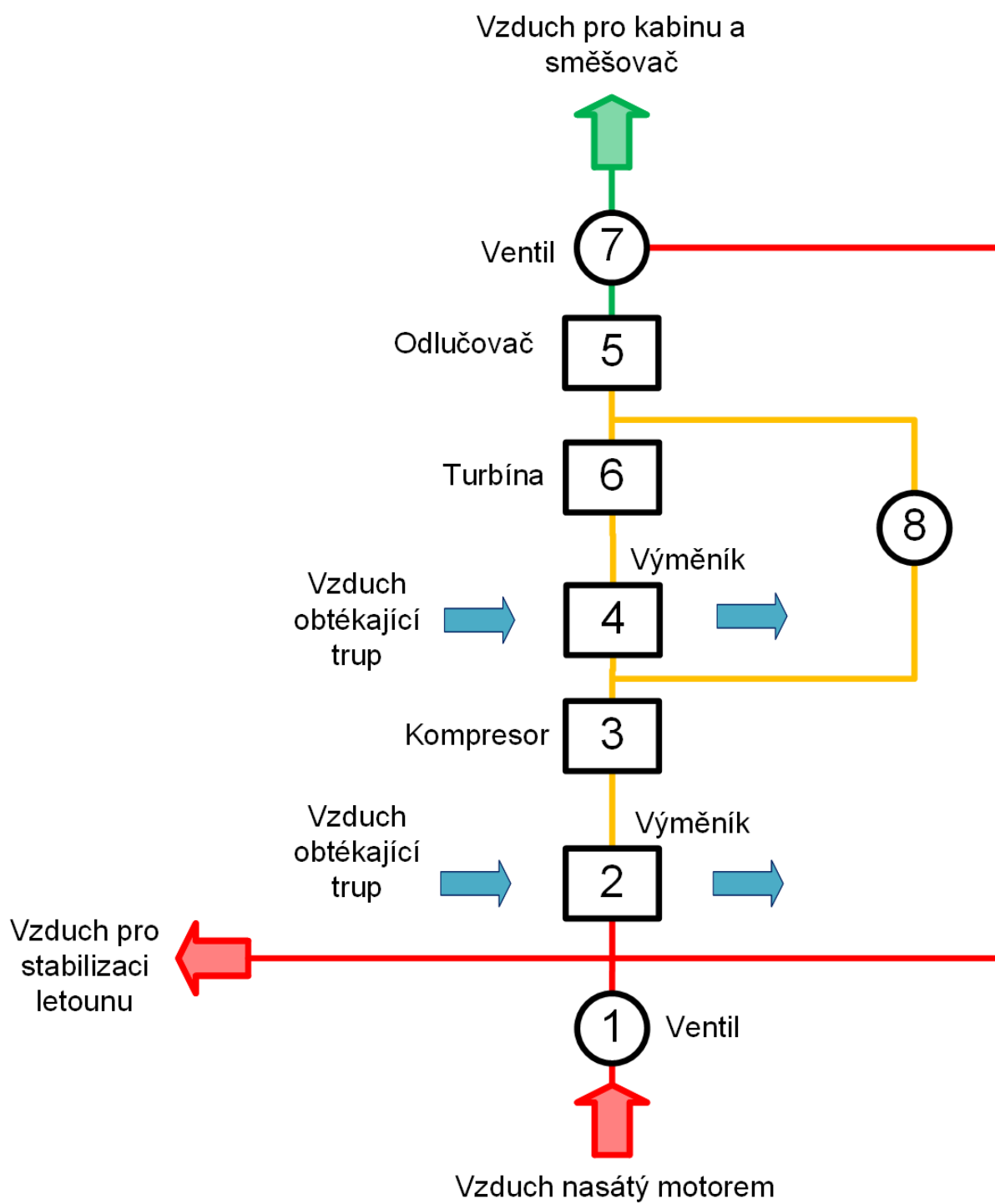
Standardně si pravá klimatizační jednotka (Right Pack) bere vzduch z motoru číslo 2 (číslování je zleva doprava) a levá (Left Pack) z motoru číslo 1. Schéma pravé klimatizační jednotky viz Obrázek 19, samotná jednotka viz Obrázek 20.[66][67][68][42][69]

Vzduch nasátý motorem vstupuje do jednotky přes uzavíratelný ventil (viz Obrázek 19 a Obrázek 20, č. 1). Následuje rozdělení distribuce vzduchu na větev, která jde do klimatizační jednotky, vzduchového rozvodu pro stabilizaci letounu a větve s teplým vzduchem ústící na konec klimatizační jednotky.[67][68][42][69]

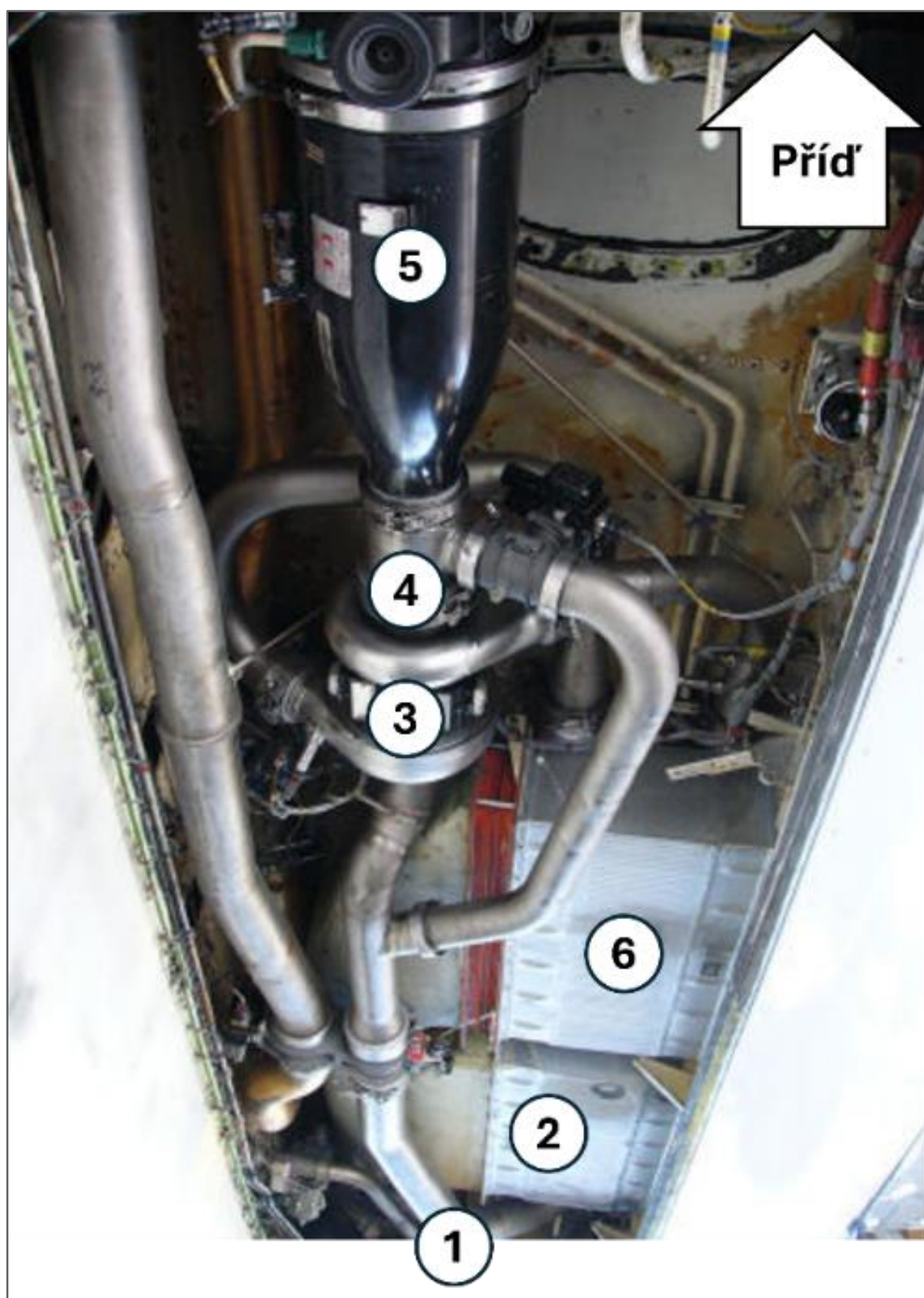
Vzduch ve vedení jdoucí do klimatizační jednotky vstupuje nejdříve do prvního výměníku (viz Obrázek 19 a Obrázek 20, č. 2), který je omýván vzduchem obtékající trup letounu. Pokračuje

do kompresoru (viz Obrázek 19 a Obrázek 20, č. 3), který zvýší jeho tlak a teplotu. Odtud je, podobně jako v případě A 320 family, vyvedeno vedení teplého vzduchu s ovládacím ventilem (viz Obrázek 19, č. 6). Toto vedení ústí za turbínu a jeho funkce bude zmíněna dále. Druhá větev vedení se vzduchem pokračuje do druhého výměníku tepla, protože je potřeba jej znovu ochladit. (viz Obrázek 19 a Obrázek 20, č. 4). Výměník je zase chlazen pomocí vzduchu obtékajícího letoun. Poté vstupuje vzduch z výměníku do expanzní turbíny (viz Obrázek 19 a Obrázek 20, č. 6), která dále snižuje jeho teplotu a tlak. Kvůli odstranění vlhkosti je nakonec zařazen odlučovač vody (viz Obrázek 19, č. 7), který vytváří podmínky pro rosný bod. K tomu mu pomáhá regulace teploty vzduchu pomocí výše zmíněné větve za kompresorem. Vysrážená voda je stejně jako v případě letounů A 320 family vstříknuta do výdechové části kanálu, kterým je na výměníky přiváděn vnější vzduch. Za odlučovačem je dále ústí větve s horkým vzduchem. Toto ústí je osazeno směšovacím ventilem (viz Obrázek 19, č. 7). Ten slouží k poměrovému přidání teplého vzduchu do studeného tak, aby bylo dosaženo nastavené teploty pro směšovač letounu. Směšovací ventil reguluje poměr studených a horkých proudů pomocí dvou ventilů spojených společnou hřídelí, takže když je jeden zcela otevřený, tak je druhý zavřený.[67][68][42][69]

Obrázek 19 – Schéma klimatizační jednotky u B 747

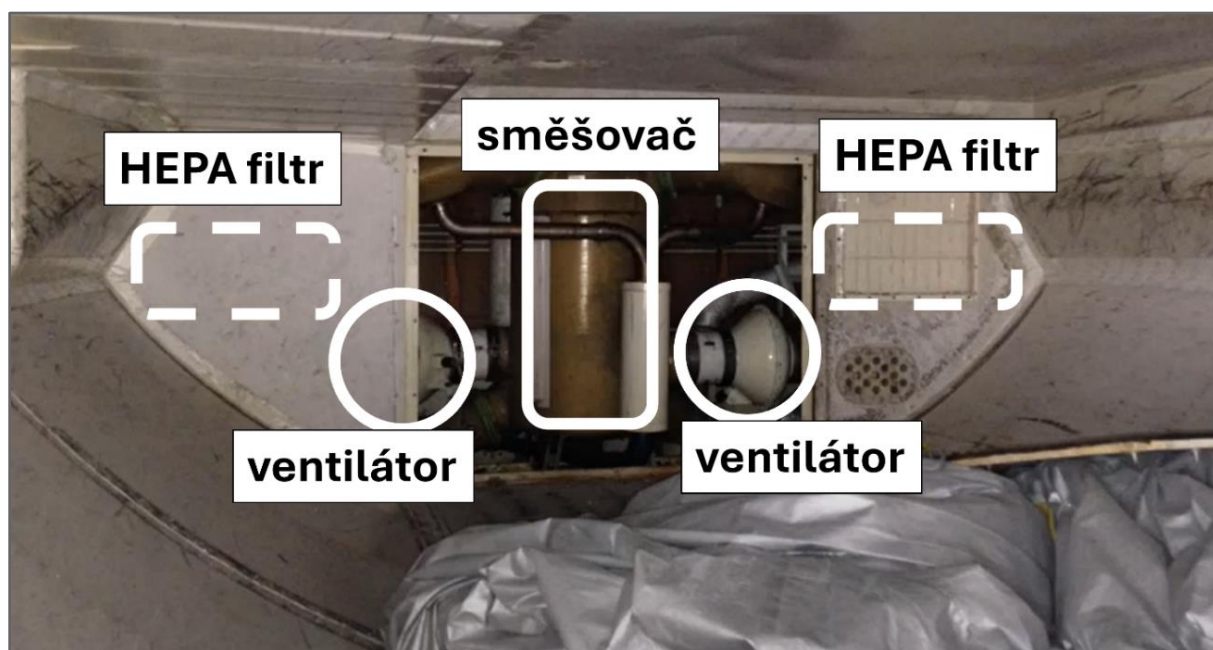


Obrázek 20 – Fotografie klimatizační jednotky B 737



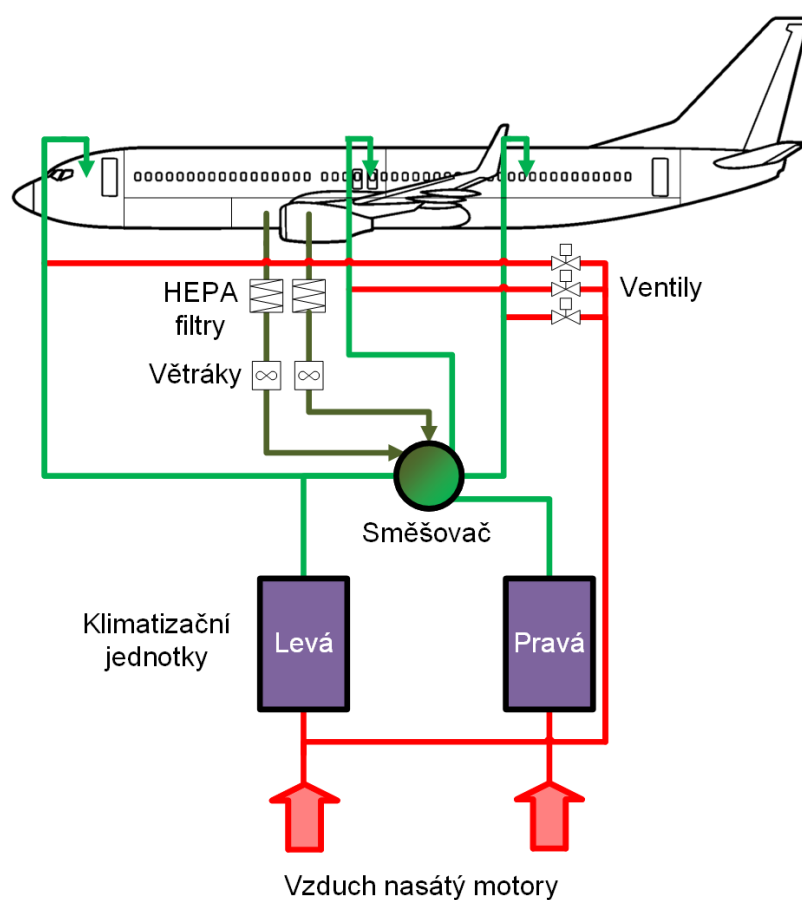
Vzduch o zvolené teplotě pokračuje levou klimatizační jednotkou do pilotní kabiny a do směšovače letounu. Z pravé klimatizační jednotky vede jenom do směšovače. Vzduch z klimatizačních jednotek se ve směšovači míchá se vzduchem ze všech sekcí kabiny viz dále. Výsledná směs je distribuována zpět ke stropu do kabiny cestujících, odkud padá do nákladového prostoru. Zde jsou mezi nákladovými prostory dva ventilátory, které odsávají vzduch zpět do směšovače letounu. Před těmito ventilátory jsou umístěny HEPA filtry, viz Obrázek 21. [67][68][42][69]

Obrázek 21 – Umístění HEPA filtrů a směšovače v B 737



Teplota v kabině se pak reguluje přidáním teplého vzduchu nasátého motory, který je odveden před uzavíratelný ventil (viz č. 1 na Obrázek 5 a Obrázek 6). Kompletní schéma filtroventilace je uvedené na Obrázek 22.[67][68][42][69]

Obrázek 22 – Systém filtroventilace v B 737



Na rozdíl od letounu Airbus jsou HEPA filtry pro B 737 kvadratické, viz Obrázek 23, filtr výrobce PTI Technologies. [70]

Obrázek 23 – HEPA filtr pro B 737 (PTI Technologies) [70]



Filtry pro letouny B 737, dle dostupných informací, vyrábějí společnosti:

- Aerospace Filtration Systems;
- Camfil;
- Donaldson Company;
- Freudenberg Filtration Technologies;
- Hasmak;
- Nordic Air Filtration;
- Pall Corporation;
- PTI Technologies;
- Purolator.

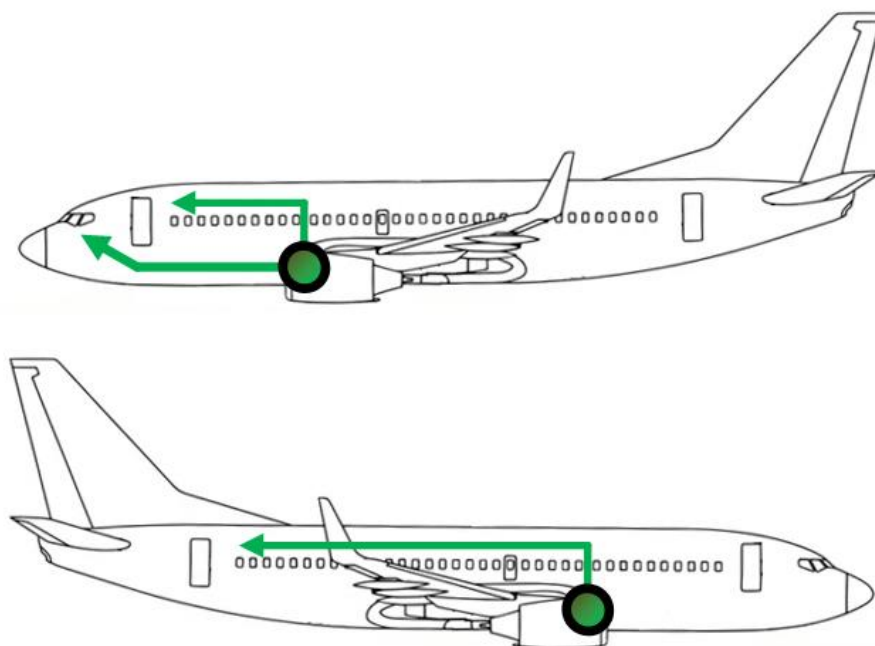
Konkrétní informace se ale podařilo dohledat pouze pro filtry uvedené v Tabulka 13.

Tabulka 13 – Filtry pro B 737 filtry a jejich výrobcem deklarovaná zachytlost [70][71][72]
[73][74][75]

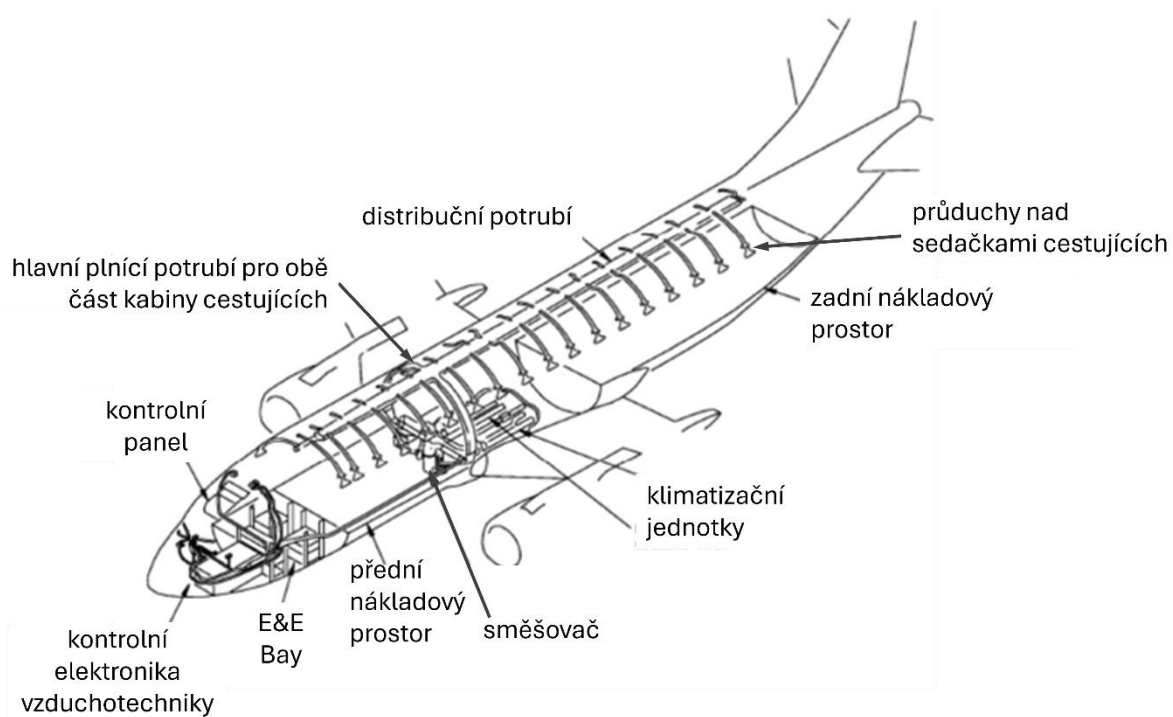
Výrobce	Donaldson Company	Pall Corporation	Purolator Facet	PTI Technologies
Výrobní číslo	P199753	CD01068F2, F3	1762992	7600002-101
HEPA filtr	Ano	Ano	Ano	Ano
Účinnost pro částice [%]	Neuvedeno	99,99 (páry NaCl)	99,97 (3 µm)	99,97 (3 µm)
Doporučená výměna [h provozu]	4 000 – 6 000	4 000 – 6 000	6 000	4 000 – 6 000
Doporučená výměna od instalace [roky]	5 (1800 dní)	neuvedeno	neuvedeno	neuvedeno
Prach	ano	ano	ano	ano
Bakterie	ano	ano	ano	ano
Viry	ano	ano	ano	ano
Těkavé organické sloučeniny	Neurčeno	ano	neuvedeno	neuvedeno

Samotná distribuce vzduchu na palubu letounu je řešena jinak, než u letounů A 320 family. Podle varianty trupu (krátká/dlouhá) jsou ke stropu kabiny cestujících, v místě kde je slučovač letounu, vyvedeny 2 nebo 3 silné hlavní plnicí potrubí obdélníkového průměru. Zde na ně navazují tenké distribuční trubky z nichž jsou vyvedeny trubky s průduchy. To vše s tím, že do pilotní kabiny je vedena po levé straně trupu zvláštní trubka. Schéma pro krátkou variantu trupu viz Obrázek 24 a Obrázek 25, pro dlouhou variantu viz Obrázek 26 a Obrázek 27.

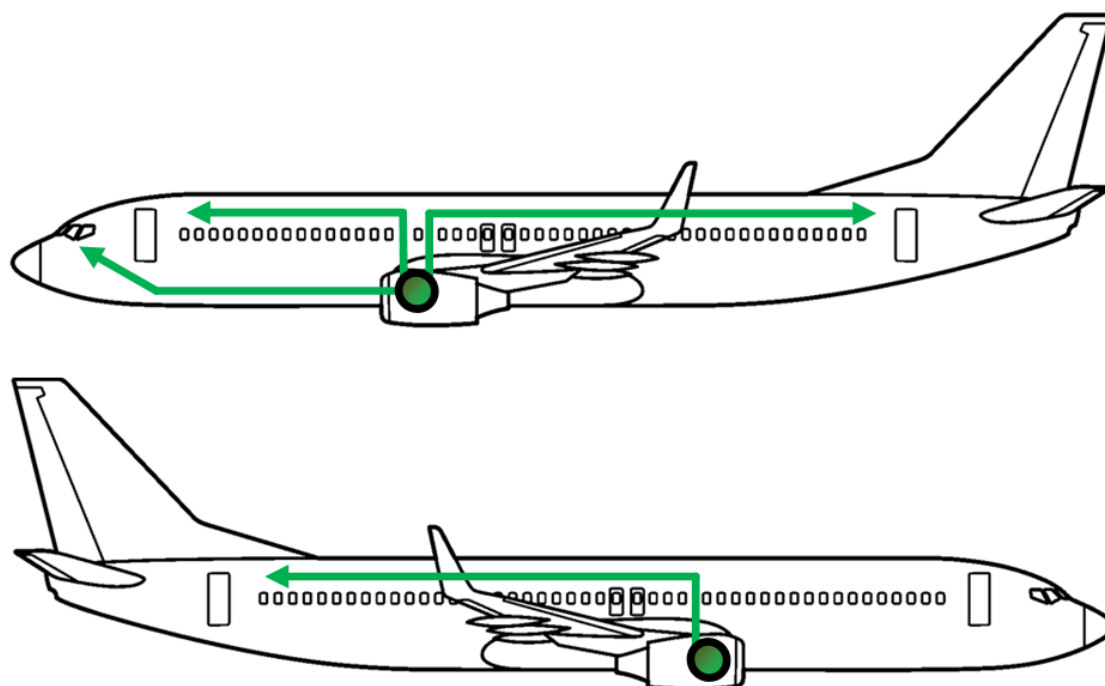
Obrázek 24 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu B 737-700



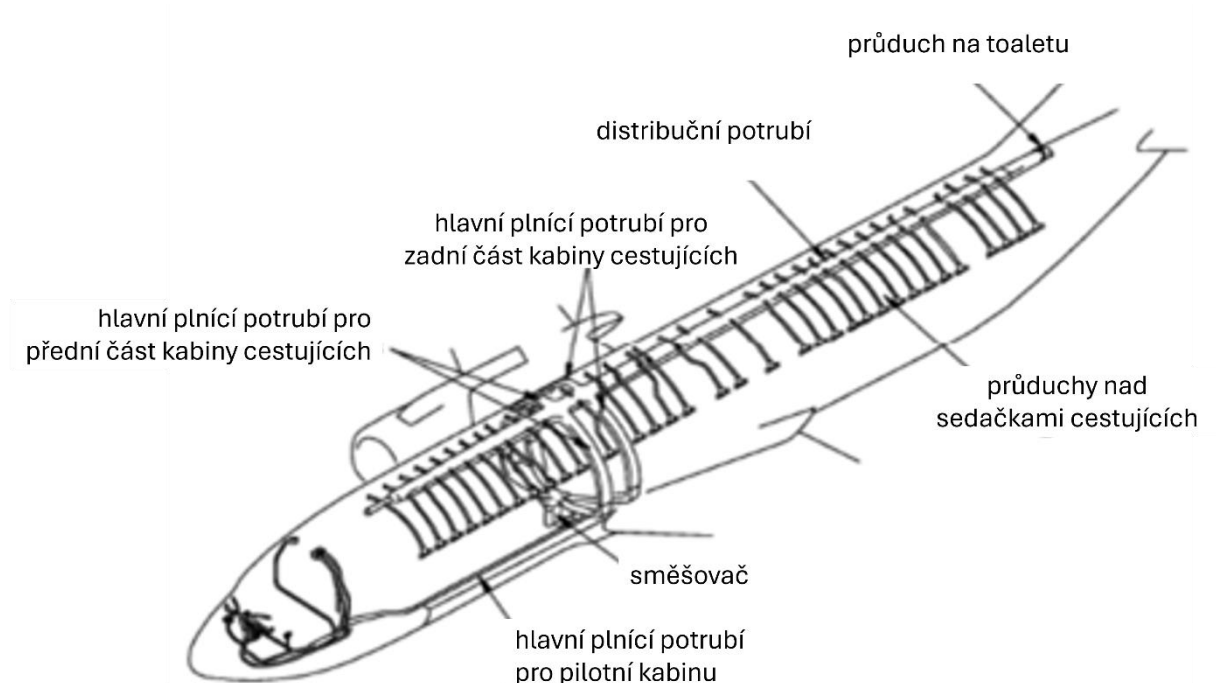
Obrázek 25 – Distribuce vzduchu v letounu B 737 s krátkou variantou trupu



Obrázek 26 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu B 737-800



Obrázek 27 – Distribuce vzduchu v letounu B 737 s dlouhou variantou trupu



I letoun B 737 má systém chlazení různých technologických celků, jako jsou pilotní panely, zobrazovací jednotky, avionika a všeobecně hardware. To je řešeno tak, že z kabiny cestujících je nad pasažéry odsáván vzduch, a to jedním větrákem, který je zálohován druhým s alternativním zdrojem. Přehřátí výše uvedených komponent by totiž mohlo být pro let kritické. Odsávaný vzduch je distribuován do pilotního panelu. Aby nedocházelo ke kumulaci teplého vzduchu a podpořilo se šíření vzduchu s normální teplotou, je z kontrolního panelu pod palubu vyvedeno druhé vedení. To je také osazeno dvěma větráky (běžný a záložní). Ty ale naopak vzduch odsávají. Vedení dále odsává vzduch z panelu jističů (Circuit Breaker Panel, dále jen C/B panel) a elektronické a elektrické sekce (Electrical and Electronics Bay, dále jen E&E Bay, viz Obrázek 25). C/B panel je panel jističů, který se nachází v pilotní kabině a obsahuje různé jističe pro elektrické systémy letounu. E&E Bay je umístěna na úrovni nákladového prostoru za předním podvozkem a jsou v ní umístěny akumulátory, navigační a komunikační systémy, systémy řízení letu další elektronické systémy s elektrickými jističi. Pokud je B 737 na letišti, respektive pokud neletí, je tento teplý vzduch odváděn skrze ventil vně trupu. Za letu je jím vyhřívána přední část nákladového prostoru, kam se většinou umisťují živá zvířata. [42][76][77][78]

4.3. Specifikace zkoumaných filtrů letounů

Byly zkoumány mikroporézní filtry válcovitého tvaru s dutým vnitřkem. Jejich konstrukce sestávala z kovové kostry, uvnitř které byly dvě vrstvy netkané textilie ze skelných vláken (na vstupní a výstupní straně), mezi nimiž se vyskytovala sypká látka černé barvy. Ze zjištěných informací můžeme předpokládat, že se jednalo o aktivní uhlí, náplň ale nebyla chemicky zkoumána, protože cílem bylo zjistit účinnost filtru jako takového. Filtry pocházely z letounu A 319 a byly vyjmuty při pravidelné údržbě po 5 000 hodinách provozu. Letoun neopustil vzdušný prostor Evropy.

Vzhledem k tomu, že nemáme schválení od výrobce filtrů, nebudeme filtry samotné, ani typ filtru blíže v práci specifikovat.

Bližší informace k samotnému zkoumání viz kapitola 3.2 Laboratorní zkoumání HEPA filtrů z letadla.

4.3.1. HEPA filtry

Vysoce účinné filtry vzduchu pro odlučování částic s nízkým průnikem používané ve filtroventilacích mohou být dle České technické normy pro vysoce účinné filtry vzduchu, která je českou verzí evropské normy, označeny jako:

- EPA (účinný filtr vzduchu pro odlučování částic);
- HEPA (vysoce účinný filtr vzduchu pro odlučování částic);
- ULPA (filtr vzduchu s velmi nízkým průnikem). [79]

Pro zkoušení jednotlivých filtrů se standardně využívá kapalný aerosol nebo pevný aerosol s relativní velikostí částic maximálně 0,3 μm , což je velikost částice s nejlepší prostupností HEPA filtrem. [80]

Jmenovité podmínky vzduchu jsou při zkoušení před jeho vhánění do kanálu:

- Teplota 23 ± 5 °C;
- Relativní vlhkost 75 %.

Při samotném proudění vzduchu ve zkušebním kanále musí být teplota i vlhkost vzduchu konstantní s maximální odchylkou ± 2 °C u teploty a ± 5 % u vlhkosti. Postupuje se ve třech krocích:

- Zkouška plochého filtračního materiálu, kterou se zjišťuje rozsah velikostí částic při jmenovitém průtoku; [81]
- Zkouška netěsnosti filtračního prvku, kterou se zkouší nepřítomnost netěsností při jmenovitém průtoku; [82]
- Zkouška účinnosti filtračního prvku, kterou se stanovuje celková účinnost při jmenovitém průtoku. [83]

HEPA filtry jsou filtry, které mají na základě zkoušení účinnost minimálně 99,95 % s průnikem 0,05 % pro celkovou hodnotu a minimálně 99,75 % s průnikem 0,25 %. [79]

Částice menší, než 0,3 μm zachycují HEPA filtry efektivněji kvůli tomu, že se pohybují více chaoticky, díky Brownovu pohybu, a je u nich tedy větší pravděpodobnost, že narazí na vlákna filtru a budou zachyceny. Proto mohou být HEPA filtry velmi účinné i při zachytávání částic menších než 0,3 μm a to až do velikosti 0,1 μm . Pro jejich záchyt je důležitá tzv. poréznost, tj. míra volných prostorů mezi vlákny. Mechanismus záchytu částic jsou pak buď tzv.:

- Difúze – zachycuje nejmenších částice, které při průchodu vzduchem okolo vlákna s vláknem reagují;
- Zachycením v sítu – filtrační mechanismus, kdy se částice zachytí mezi systém vláken.

Další mechanismy záchytu, které jsou ale účinné u větších částic jsou:

- Náraz – obvykle funguje na velkých a těžkých částicích, které při obtékání vlákna vzduchem nezmění dostatečně rychle směr a o vlákno se zastaví;
- Zachycením – je účinné na střední velikosti částic, kdy viskózní proud vzduchu při vstupu do filtračního média proudí kolem vlákna, které na sebe částici připoutá. [84][85]

Tyto mechanismy se vyskytují i u vláken nanotextilií. [85]

Studie provedena v nemocnici v Bandar Lampungu zjistila, že použití HEPA filtrů významně snižuje počet bakterií ve vzduchu. [86]

Další studie dlouhodobého používání filtrů tvrdí, že HEPA filtry si zachovávají vysokou účinnost při zachytávání částic i po dlouhodobém používání. Předpokladem je ale jejich pravidelná kontrola a údržba. Dalším faktorem je úroveň znečištění vzduchu a jeho vlhkost. [87][88]

Samotný HEPA filtr je většinou tvořen rámem, který dělá jeho tvar. Rám může být zhotoven z plastu, tvrdého papíru nebo lehkého kovu, např. hliníku. Někdy rám přechází v jakousi konstrukci, ve které jsou další části filtru. Tato konstrukce může být navržena tak, aby nejen plnila svůj primární účel, tj. zajištění větší robustnosti a pevnosti filtru, ale aby i současně usměrňovala proudění vzduchu na další vrstvy filtru. [89]

Tou je skládaná netkaná textilie, která je většinou vyrobena ze skelných vláken. Skládáním

textilie se zvětšuje její plocha, tj. plocha určená pro filtraci. Následovat může náplň filtru, většinou aktivní uhlí. To pomáhá pohlcovat některé těkavé látky a pachy. Jako poslední vrstva je opět skládaná netkaná textilie, případně ještě druhý strana konstrukce rámu. Náplň a druhá vrstva textile mohou být ve složení HEPA filtru vynechány. [89]

4.3.2. HEPA filtry a záchyt bakterií

Dle výrobců HEPA filtrů, viz Tabulka 10 a Tabulka 13, umí tyto filtry zachytávat biologický agens, tedy i bakterie. Ty jsou ale na rozdíl od virů živé. Je tedy otázka, co se s nimi na filtru dále děje. [90]

Studie, která zkoumala tuto problematiku u různých mikroorganismů na HEPA filtrech, došla k závěrům viz Tabulka 14: Experiment probíhal tak, že filtry byly umístěny do Hendersonova aparátu, kde na ně byly bakterie nanášeny s aerosolem pomocí Collisonova nebulizátoru. Následně byly filtry umístěny do ventilátoru, kde byly vystaveny čistému vzduchu po dobu 6 dnů při konstantní rychlosti proudění vzduchu 0,4 – 0,5 m/s (1,44 – 1,8 km/h). U *Aspergillus brasiliensis* byla tato doba stanovena na 210 dnů. [90]

Po této expozici byly filtry odstraněny z ventilátoru a byly umístěny do fosfátového pufru obsahujícího sterilní skleněné kuličky a vortexovány, aby se uvolnily zachycené mikroorganismy. Následně byly provedeno sériové ředění a kultivace na vhodném agaru. [90]

Tabulka 14 - Přežití bakterií na HEPA filtru [90]

Název	Přežil	Poznámka
<i>Bacillus atrophaeus</i>	Ano	Bez úbytku 6 dnů
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	Ano	Úbytek 5 log po 6 dnech
<i>Escherichia coli</i>	Ne	Ztráta životnosti po 48 hodinách
<i>Brevundimonas diminuta</i>	Ne	Ztráta životnosti po 48 hodinách
<i>Aspergillus brasiliensis</i>	Ano	Bez úbytku 210 dnů

4.4. Pilotní pokus s nanotextilním filtrem

Použitá čistička byla vyrobena v České republice a jedná se o elektrický výrobek. Její konstrukce je jednoduchá. Vstupní část proudí skrze ventilátor vzduch do zařízení, kde je umístěn standardní HEPA filtr (HEPA 13 dle ČSN EN 1822-1), viz Obrázek 28, číslo 1. Vzduch je pak opět vydechován zpět do prostoru. Za HEPA filtrem, na jeho výstupní straně, je ještě zařazen uhlíkový filtr z houbovitého materiálu, viz Obrázek 28, číslo 2.

Obrázek 28 – HEPA filtr z čističky vzduchu



HEPA filtr byl vyjmut na konci své životnosti, tj. 6 měsíců, s tím, že v tomto období byla domácnost, kde byl provozován, obývána dvěma dospělými osobami bez jakýchkoliv příznaků respiračních onemocnění. Následně byly udělány stěry a na analyzátoru provedeny 4 cykly pro HEPA filtr, vždy 2 pro vstupní a 2 pro výstupní část a 2 cykly stěrů z uhlíkového houbovitého filtru.

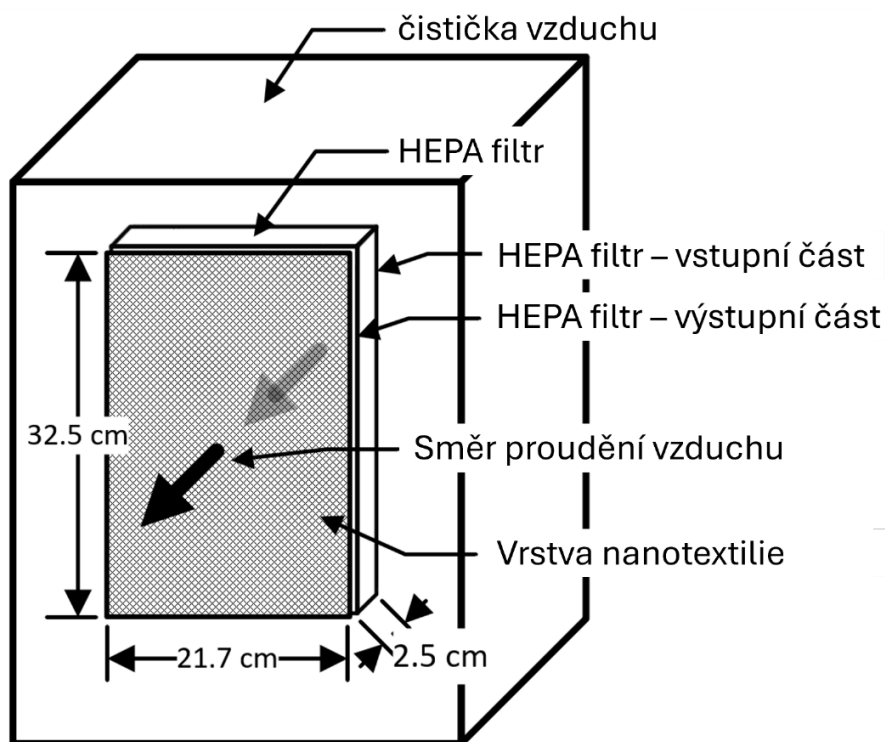
Poté byl HEPA filtr nahrazen samotnou nanotextilií, kdy byly prostor pro uchycení HEPA filtru vyplněn nanotextilií a pečlivě utěsněn. Takto upravená čistička byla v provozu 120 hodin bez přerušení. Následně byly opět odebrány stěry a provedeno 5 cyklů v analyzátoru. Kvůli příliš tenké nanotextilii byla otřena pouze vstupní plocha.

Následoval pokus v rámci kterého byl nainstalován nový HEPA filtr, který byl na jeho výstupní straně překryt nanotextilií, a to tak aby nebyla tato vrstva obtékána vzduchem. Rozměry HEPA

filtru byly 325 x 156 x 25 mm a nanotextilie pokrývala jeho širší stěnu, viz Obrázek 29. V této sestavě byla čistička provozována 100 hodin. Nanotextilie byla třikrát v pravidelných intervalech vyměněna. Na konci pokusu jsme získali jeden HEPA filtr a 3 kusy nanotextilie z nichž byly odebrány vzorky (vstupní a výstupní strana HEPA filtru, vstupní strana nanotextilií). Na nich bylo provedeno 5 samostatných cyklů analyzátoru.

Součástí pokusu bylo i odebrání vzorku sputa ze sliznice osoby, která se v místnosti s čističkou pohybovala po celou dobu pokusu. Tato osoba byla považovaná za tzv. „zdroj uvnitř.“, tj. zdroj ze kterého pochází biologická agens. Na tomto vzorku proběhl 1 cyklus.

Obrázek 29 – Pilotní pokus s nanotextilním filtrem [91]



Ve všech případech byla použita nanotextilie vyrobená společností NANOTEX GROUP s.r.o. a to z polyamidu 6 s tloušťkou vláken 100 – 500 nm a porézností vláken 50 nm. Nosnou vrstvou v nanotextilii, viz kapitola 4.4.1 Nanotextilie, byla netkaná textilie z polyesteru.

Dále byl během všech pokusů nastaven průtok vzduchu na 0,4 m³/s (400 dm³/s). Ionizace vzduchu byla vypnuta. Zařízení bylo spuštěno v místnosti o ploše 63 m² a celkovém objemu vzduchu 138,6 m³. Pokusy byly provedeny během jarní sezóny 2019 a 2021 při pokojové teplotě v rozmezí od 20 °C do 25 °C.

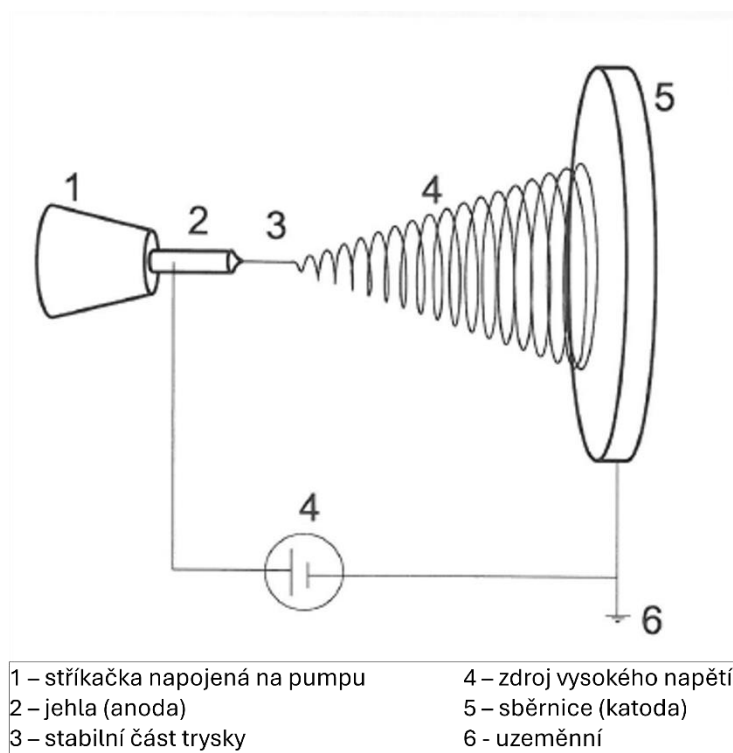
Bližší informace k jednotlivým stěrům a běhům viz kapitola 3.3 Laboratorní zkoumání nanotextilie z HEPA filtru čističky vzduchu.

4.4.1. Nanotextilie

Nanotextilie se používají napříč různými obory, především zdravotnictvím, a dále obory, které jsou spojeny s životním prostředím. Jsou používány pro kontrolované a cílené dodávání léčivých látek do těla, v rámci tkáňového inženýrství, jako prostředky pro hojení ran, dále pak jako součást biosenzorů, lékařských implantátů a v neposlední řadě se nanotextilie používají k filtraci vody, vzduchu a krve. [92][93]

Nanotextilie jsou netkané látky, jejichž vlákna mají o řád menší průměr než vlákna používaná v ostatních netkaných materiálech. Nejběžnější způsobem jejich výroby je elektrostatické zvlákňování, které spoívá ve vystavení roztoku, připraveného z přírodních (celulóza, keratin, kolagen) nebo syntetických (polylaktid, polyuretan, polyhydroxyalkanoáty a další) polymerů. Proces probíhá obvykle tak, že na anodu je vyveden polymerní roztok, který katoda přitahuje směrem k sobě, viz Obrázek 30. Anoda může být ve tvaru jehly nebo např. válce, šterbinové desky, aj. (pak se jedná o tzv. bezjehlové elektrostatické zvlákňování). Druhá metoda umožňuje výrazně zvýšit produktivitu vláken. Výsledkem procesu jsou velmi jemná vlákna o průměru 50 - 500 nm. Napětí mezi elektrodami musí být velmi vysoké, pohybuje se v rozmezí 10 kV až 30 kV. Poloha elektrod může být vertikální i horizontální. Vzniklá vlákna se musí nanášet na nosný materiál, protože sama o sobě jsou příliš křehká. [96][97][98]

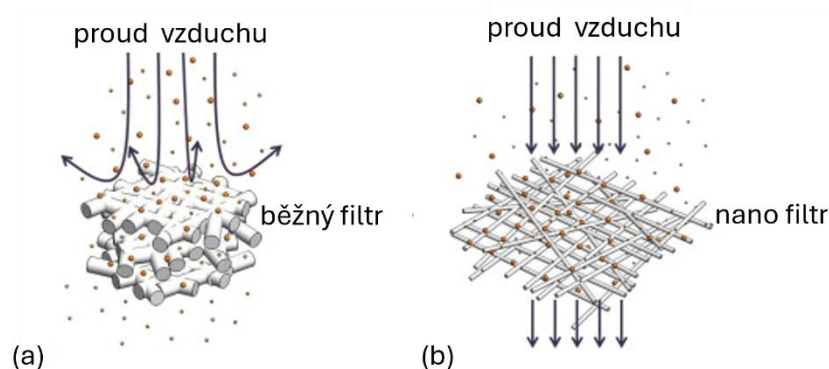
Obrázek 30 – Schéma elektrostatického zvlákňování s jehlou [98]



V době pandemie nemoci covid-19 došlo k masivnímu rozšíření používání nanotextilií v oblasti ochrany dýchacích cest. Důvodem byla jejich prokázaná schopnost zachycovat viry. To je dáno především díky jejich velké povrchové ploše vzhledem ke své hmotnosti. Větší povrchová plocha umožňuje více reagovat s ostatními látkami. V případě filtrace vzduchu pak efektivnějšímu zachytávání malých částic. [94][95]

Čím mají vlákna v netkané textilií menší průměr, tím je větší filtrační účinek, protože menší vlákna mohou zachytit menší částice. Na druhou stranu, menší průměr vláken zvyšuje odpor vzduchu, což vede k poklesu tlaku vzduchu procházející textilií. To se celkově projevuje jako menší propustnost, což negativně ovlivňuje filtrační účinek. U nanotextilií je průměr vlákna velmi malý, často pod 100 nm. Takový průměr je srovnatelný s průměrnou volnou dráhou molekuly vzduchu, tedy vzdáleností, kterou molekula urazí než narazí do jiné molekuly. To vede k tomu, že molekuly vzduchu se o sebe nezastavují jako v případě větší vláken, ale kloužou po jejich povrchu. Tím je způsoben výrazně menší nárůst tlaku při průchodu vzduchu skrze nanotextilie oproti jiným netkaným textiliím. Popisovaný jev viz Obrázek 31. [99][100]

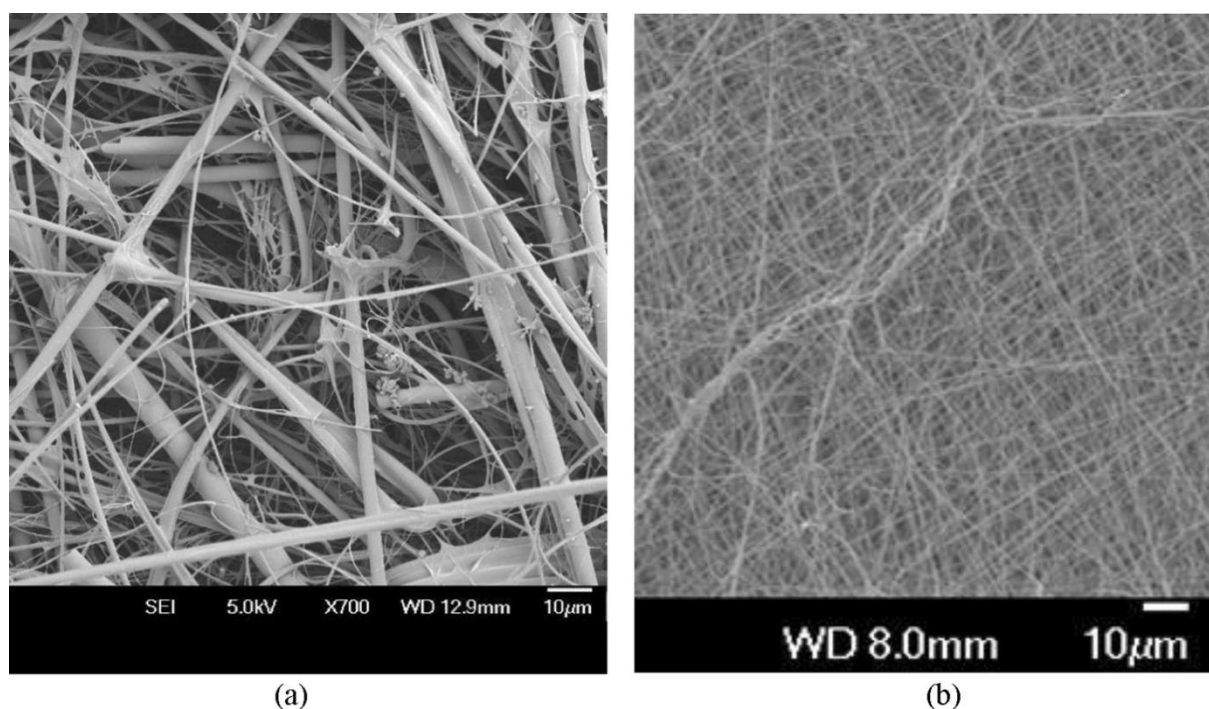
Obrázek 31 – Rozdíl v propustnosti filtrů



Například při porovnávání filtrační účinnosti nanovlákněné textilie z polycaprolactamu a z HEPA filtru (testovací částice měla velikost $0,3 \mu\text{m}$ s rychlostí vzduchu $0,05 \text{ m/s}$, tj. $0,18 \text{ km/h}$) ukazují výsledky, že filtrační účinnost nanovlákněné textilie může dosáhnout $99,993 \%$, což je vyšší účinnost, než u zkoumaného HEPA filtru. Pokles tlaku na výstupu z filtru byl pak u nanovlákněné textilie nižší. [101]

Obrázek 32 ukazuje velikost vláken netkané textilie ze skleněných vláken použité v HEPA filtru a netkané textilie z elektrostaticky zvlákněných polyakrylonitrilových nanovláken. Při stejném zvětšení mají nanovláknena menší průměr a jsou hustěji zapletena.

Obrázek 32 – Srovnání vláken HEPA filtru (a) a nanovláken (b) při stejném zvětšení. [102]



V rámci zkoumání účinnosti filtrace vzduchu od aerosolových částic o velikostech 100 – 500 nm bylo zjištěno, že účinnost konvenčních mikrovláknitých filtrů z netkané textilie vyrobených ze sklených vláken o průměru v řádech desítek mikrometrů je nižší než u nanovláknitých filtrů. Dále bylo zkoumáno, zda filtrace není spojena s výrazným poklesem tlaku vzduchu při průchodu filtrem. To se nepotvrdilo. Experimenty ukázaly, že tlakový spád, tj. rozdíl tlaku mezi dvěma body, kterými proudí tekutina, je lineárně závislý na tloušťce filtru. Při porovnání jednotlivých kombinací ale bylo zjištěno, že u dvojité vrstvy mikrovláknitého filtru je tlakový spád o něco vyšší než u tří vrstev. Experimentální data dále ukazují, že homogenita struktury filtru je klíčovým parametrem pro nanovláknité filtry. Příliš tenké vrstvy mohou mít nežádoucí jev, tzv. "tunelování" aerosolového proudu přes zóny s vyšší lokální porozitou, což vede k větší pronikavosti aerosolových částic o zkoumané velikosti. V závěru autoři k filtraci doporučili trojvrstvý nanovláknitý filtr s:

- tenkou nosnou vrstvou vyrobenou z větších vláken až o desítkách nanometrů, která má hustou strukturu vláken;
- s tlustou střední vrstvou, složenou z nano vláken, která je mnohem poréznější a je určena pro přesné zachycení aerosolových částic;
- třetí vrstvou mocnější než nosná s většími mezerami mezi vlákny (v řádech jednotek mikrometrů), která být také spíše porézní. [103]

Zmíněné pokusy byly prováděny s nanotextilií z polypropylenu, která byla vyrobena technologií „melt-blown“. Ta spočívá v tavení polymerní pryskyřice, která je následně extrudována přes malé trysky a vystavena proudu vzduchu o velké rychlosti. Tento proces vytváří vlákna, která jsou zachycena na pohyblivém dopravníku nebo bubnu. [103]

Další studie, která se zabývala filtrováním částic o průměru menším než 2,5 μm v budovách, uvádí, že využití nanofiltrů může přispět k jejich snížení. Studie zkoumala vliv různých parametrů filtru na výsledek filtrace, a to včetně průměru vláken, tloušťky filtru a jeho hustoty. Výsledky ukazují, že účinnost odstranění uvedených částic byla negativně spojena s průměrem vláken a pozitivně s tloušťkou filtru. Nebyla ale zjištěna žádná jasná korelace mezi účinností odstranění částic a hustotou zapletení vláken. Závěrem studie uvádí, že nanovláknité filtry jsou nejen tenké, flexibilní a lehké, ale také vykazují vysokou účinnost filtrace částic a nízký odpor

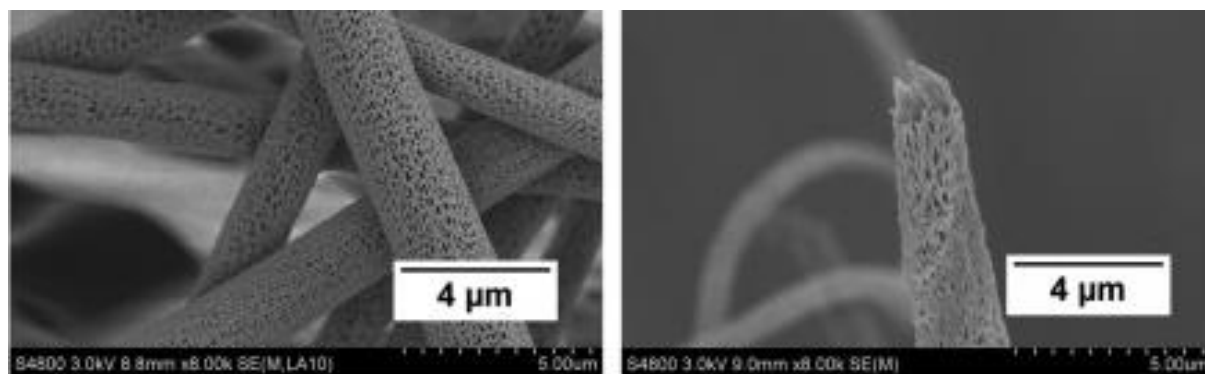
vzduchu a mohou být potenciálně použity v interiérech k efektivnější filtraci částic o průměru menším než 2,5 μm s tím, že existují omezení pro filtraci spočívající v nárůstu zatížení filtru prachovými částicemi. Tyto vytvořily vrstvu, která by se postupně zvětšovala. V důsledku toho by se výrazně snižovala účinnost filtru, např. jako v jednom případě z 98,61 % na 60,06 %.

Při tomto výzkumu bylo použito 25 nanotextilních filtrů z nylonu, které byly vytvořeny metodou elektrostatického zvlákňování jehlou. [104]

Studie zabývající se využitím nanotextilie vyrobené polymerací kyseliny mléčné, která se typicky získává z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny, zjistila, že kromě velikosti vláken je klíčová také jejich pórovitost. Při experimentálním ověření účinnosti filtrů byly použity textilie složené ze dvou druhů vláken:

- o průměru menším než 150 nm, které neměly žádné póry (dále jen PLA-N);
- o průměrech v řádech nižších jednotek μm , které měly póry v řádech 30–64 nm (dále je PLA-P), viz Obrázek 33.

Obrázek 33 – Póry na vláknech textilie [105]



Výsledkem bylo, že mírný hmotnostní poměr PLA-P vláken u filtrů z PLA-N zlepšil filtrační výkon, zatímco příliš velký hmotnostní poměr PLA-N vláken vedl k nižší kvalitě a vysokému tlakovému spádu. Dále byly zjištěny rozdílné charakteristiky u filtrů, které se skládaly:

- ze dvou vrstev vláken; horní vrstva z PLA-N a spodní z PLA-P vláken;
- z jedné vrstvy tvořené PLA-N a PLA-P vlákny, která jsou ve filtru rozmístěna náhodně.

Filtry se dvěma vrstvami nanotextilií vykazovala vyšší filtrační účinnost a kvalitu než filtry s

jednou vrstvou z prokládaných vláken. Poměr PLA-N vláken a PLA-P vláken byl u obou typů filtrů stejný. Nejlepší filtrační účinnost vykazoval dvouvrstvý filtry s hmotnostním poměrem 1/5 PLA-N k PLA-P vláknům a to:

- 99,989% a pokles tlak 300,1 Pa při rychlosti proudění vzduchu 0,141 m/s (cca 0,5 km/h);
- 99,999% s poklesem tlaku 93,3 Při rychlosti proudění 0,053 m/s (cca 0,2 km/h).

To jsou lepší výsledky než u HEPA filtrů.

Vlákna byla vyrobena metodou elektrostatického zvlákňování. K ověření účinnosti filtrů byla použita standardní metoda pro HEPA filtry, která používá aerosolové částice NaCl o průměru 260 nm (hmotnostní střední průměr) a 75 nm (početní střední průměr) připravené generátorem aerosolových částic. Testování probíhalo při pokojové teplotě s kontinuální rychlostí proudění vzduchu 0,053 m/s (cca 0,2 km/h) a 0,141 m/s (cca 0,5 km/h), tzn. že průtok vzduchu byl 0,533 dm³/s (cca 5·10⁴ m³/s) a 1,417 dm³/s (cca 1·10³ m³/s) [105]

4.4.2. Nanotextilie s možností samostatné dezinfekce

Kromě účinnosti filtru je velmi důležitá také jeho životnost. Ta může ovlivnit umístění filtru do filtroventilačního systému. Pokud by např. bylo nutné filtr často měnit, neměl by být těžko dostupný. Životnost filtru také ovlivňuje provozní náklady celého systému. Čím častěji se filtr mění, tím je provoz nákladnější.

Jednou z možností, jak prodloužit životnost filtru a zvýšit i jeho účinnost, může být jeho pravidelné čištění a dezinfekce, tj. obnova jeho původních vlastností. To přináší vyšší požadavky na jeho obsluhu celého filtroventilačního systému a může jeho provoz prodražovat. Proto by bylo ideální, kdyby se filtr uměl udržovat, tj. dezinfikovat sám o sobě.

Samotná vlákna mohou mít antibakteriální účinek. Například výzkum, který se zabýval vývojem filtrů z více vrstev nanovlákných textilií vyrobených elektrostatickým zvlákňováním prokázal, že nanovlákna z biopolymeru N-halamine, obsahující kovalentní vazby mezi dusíkem a halogenem, mají vynikající antibakteriální schopnosti proti gramnegativním bakteriím *Escherichia coli* a grampozitivním bakteriím *Staphylococcus aureus*. V kombinaci ve vícevrstevném filtru pak prokazovaly tyto nanotextilie i vysokou filtrační účinnost a to 99,3

%. Navíc měly relativně nízký tlakový spád, tj. 183 Pa a vysokou pevnost v tahu 6,1 MPa. [106]

Pro námi uvažované účely použití nanotextilie, tj. jako filtru, který zachytí i viry, je důležité, aby měl filtr i antivirové vlastnosti, tedy aby uměl likvidovat viry. Jednou z možností, jak toho docílit je přidání stříbra do nanotextilie. To může být obsaženo ve dvou formách:

- Nanostříbro, což jsou drobné částice o velikosti 1 až 100 nanometrů (nm) rozptýlené ve filtru;
- Stříbrných drátů o průměru okolo 100 nm zapletených do nanotextilie filtrů. [107]

Stříbro je všeobecně známo pro své antibakteriální vlastnosti. Antivirové vlastnosti byly prokázány u stříbrných nanočástic a nanokompozitů. Studie ukazuje účinky proti širokému spektru virů (HIV, hepatitida B, chřipka, herpes simplex virus a další). Mechanismus účinku spočívá ve vazbě na povrchové proteiny virů, čímž narušuje jejich strukturu a funkci. Stříbro také generuje své ionty, které mohou reagovat s molekulami kyslíku a vody (vzdušná vlhkost) za vzniku aniontů kyslíku, peroxidu vodíku a hydroxylových radikálů. Tyto látky jsou vysoce reaktivní a inhibují replikaci virů a vedou k jejich inaktivaci. [108]

Bylo prokázáno, že čím větší obsah nanostříbra, tím lepší účinky. [107]

Pokud bychom uvažovali, v rámci zvýšení ekonomiky provozu, o praní filtrů z nanotextilie a jejich opětovného použití, tak je to možné, ale je potřeba sledovat úbytek stříbra při praní, protože se uvolňuje ve formě chloridu stříbrného, sulfidu stříbrného a volných iontů, čímž se snižuje jeho účinnost. [107]

V případě nanostříbra a jeho uvolňování je potřeba zmínit jeho dopad do životního prostředí. Evropská komise v roce 2015 požádala nezávislý vědecký výbor SCENIHR, aby posoudil, zda použití nanostříbra v lékařské péči nebo spotřebitelských produktech může představovat jiná rizika, než používání tradičního stříbra. Dále byl požádán o zjištění, zda použití nanostříbra, jako dezinfekčního činidla, může vést k rezistenci mikroorganismů na stříbro. Bylo konstatováno, že kvantitativní údaje o životním cyklu produktů obsahujících nanomateriály jsou obecně velmi vzácné. Nanostříbro prochází po uvolnění do životního prostředí různými vazbami, které určují jeho biologickou zátěž a toxicitu. Hlavními orgány, kde se nanostříbro objevuje jsou slezina, játra a ledviny. Některé studie naznačují, že se stříbro může ukládat v

mozku a varlatech. Také existují důkazy o tom, že ionty stříbra mohou tvořit struktury na nanoskopické úrovni in vitro. Tyto studie ukazují, že nanostříbro může stimulovat makrofágy k produkci cytokinů. Cytokiny jsou signální molekuly, které hrají klíčovou roli v regulaci imunitních odpovědí a zánětlivých procesů v těle. Indukce produkce cytokinů nanostříbrem tedy naznačuje, že nanostříbro může ovlivňovat imunitní systém. In vitro studie ale jednoznačně neprokázaly, že by dlouhodobá orální expozice nanostříbru vedla k nespecifickým změnám imunitních odpovědí. Vliv stříbra tak byl především přičítán jeho antimikrobiálnímu vlivu na tělo a jeho mikroflóru, na což existují průkazné důkazy. Nanostříbro je proto regulováno v rámci nařízení o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek (REACH), které stanovuje právní rámec Evropské unie pro chemické látky, a to v tom smyslu, že výrobci a dovozci musí poskytovat informace o vlastnostech a bezpečnosti vyráběných nanomateriálů. Dále jsou povinni tyto materiály registrovat u Evropské agentury pro chemické látky (ECHA), pokud jsou do výroby nebo dováženy do EU v množství nad 1 tunu ročně. Na použití nanostříbra v kosmetických přípravcích nebo biocidních přípravcích se pak vztahují další regulace. [109][110][111]

Další možností samostatné dezinfekce, která byla vyvinuta v rámci opatření proti šíření nemoci covid-19, je dezinfekce zahřátím nanovlákného filtru elektrickou energií. Tuto metodu vyvinul tým doc. Ing. Lukáše Vojtěcha, Ph. D. a Ing. Marka Nerudy z katedry telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické na ČVUT v Praze. Vyvinutý filtr je tvořen uhlíkovou textilií, nanotextilií a elektrodovým systémem. Uhlíková textilie vede proud, který odporem vytváří teplotu do 100 °C. Tu lze držet po dobu v řádech desítek minut. Vzhledem k tomu by mělo být zařízení schopné likvidovat většinu virů, o kterých uvažujeme, viz Tabulka 15. [112][113]

Tabulka 15 – Inaktivace vybraných virů teplotou [114][115][116][117][118]

Název	Velikost	Nemoc	Teplota [°C]	Délka vystavení [min]
Morbillivirus	100-250 nm	Spalničky	56	20
MERS-CoV	120-160 nm	MERS	65	15
Orthomyxoviridae	80-120 nm	Chřipka	60	30
SARS-CoV-1	120 nm	SARS	60	15
SARS-CoV-2	60-140 nm	COVID-19	75	3
Variola virus	200-300 nm	Pravé neštovice	60	60

Zařízení pracuje se stejnosměrným napětím 12 V. Již při vytváření tohoto systému bylo předpokládáno jeho použití na palubě letadel, ale i jiných dopravních prostředků. [112][113]

Další možnou metodou dezinfekce je ultrafialová fotokatalytická oxidace. Ta v principu funguje tak, že světlo v ultrafialovém spektru osvítlí speciální povrch pokrytý fotokatalyzátorem (obvykle oxid titaničitý). Na něm vznikne reakce, kterou se vytvoří hydroxylové radikály a superoxidové aniony. Ty působí na bakterie a viry ve vzduchu stejně jako anionty kyslíku a peroxidu vodíku a hydroxylových radikálů v případě nanostříbra. Při tom ale mohou generovat vedlejších produkty, jako je formaldehyd a acetaldehyd, které mohou být škodlivé. Konstrukčně se pak jedná o jakési reaktory, které pro své použití potřebují elektrický proud a záleží na daném zařízení, zda má být stejnosměrný nebo střídavý a jakou má mít proud sílu a napětí. Účinnost pak může být ovlivněna provozními podmínkami, jako je vlhkost, teplota a rychlost proudění vzduchu. [119][120]

4.4.3. Elektrická energie u letounů 737 a A 320 family

Vzhledem k tomu, že poslední dvě zařízení v kapitole 4.4.2 Nanotextilie s možností samostatné dezinfekce potřebují pro svůj provoz elektrickou energii, bude v této kapitole tato problematika uvedena.

Na palubě letounů A320 family se nachází jak střídavý, tak stejnosměrný proud. Elektrická síť

je napájena dvěma generátory střídavého proudu poháněnými motory a jedním generátorem, který je poháněn APU. Každý z generátorů puď střídavý proud o výkonu 90 kVA, napětím 115 - 200 V a frekvencí 400 Hz. Pro případný nouzový stav, při kterém by nefungovaly běžné generátory je systém napájen generátorem poháněným hydraulickým motorem s výkonem 5 kV. Tento generátor je poháněn tlakovým vzduchem z RAM, viz kapitola 4.2.1 Systém řízení prostředí a je umístěn mezi klimatizačními jednotkami, viz 4.2.2 Systém filtroventilace v letounu A 320 family. [121]

Stejnoseměrný proud je u letounů A 320 family získáván ze střídavého proudu pomocí usměřňovačů s výstupem 200 A a napětím 28 V. Na palubě jsou také dvě nikl-kadmiové baterie s kapacitou 23 Ah a napětím 24 V, které slouží ke startování APU a napájení základní sítě letounů v případě, že síť zatím není zásobena střídavým proudem z generátorů. Pro tento účel jsou letouny vybaveny měničem, který transformuje stejnosměrné napětí z baterie na střídavý proud o výše uvedených charakteristikách. [121]

U letounů B 737 je systém zásobování elektrickou energií obdobný. Střídavý proud je puzen generátory v motorech nebo v APU a má stejné hodnoty, tj. výkon 60 kVA, napětí 115 – 200 V a frekvenci Hz. Principiálně stejně jako u A 320 family jsou řešeny mimořádné události spojené s výpadkem generátorů, tj. použití RAM. [122]

Stejnoseměrný proud je na palubách letounů B 737 generován pomocí tří transformátorových usměřňovačů, které převádějí střídavý proud na stejnosměrný proud. Tyto transformátory jsou umístěny v E&E bay a poskytují proud o napětí 28 V. Systém stejnosměrného proudu pak zahrnuje i baterii, která slouží jako záložní zdroj napájení pro kritické systémy letounů. Baterie je připojena na nabíječku, která je schopna ji zcela nabít z 0 na 100 % během 75 minut. Také je na ni připojen měnič stejnosměrného proudu na střídavý proud. Tento slouží pro napájení střídavé sítě v případě, že je letoun v pohotovostním režimu, tzn. že generátory nepuď střídavý proud a letoun není připojen na externí zdroj, tzv. GPU. Je možné jej také použít v případě výpadku generátorů za letu. [122]

4.5. Biofilm

Biofil je komplexní struktura, která může vznikat na různých površích. Tyto mikrobiální nánosy, které se přichytávají na biologické nebo nebiologické povrchy, mohou představovat

trvalý a odolný zdroj mikrobů pro vzduch v kabině letounů. [123]

Biofilmy jsou tvořeny mikroorganismy, které produkují polymerní látky, jež tvoří matrici. Tato matrice poskytuje mikroorganismům ochranu a stabilitu, což jim umožňuje přežít v nepříznivých podmínkách a odolávat různým vnějším vlivům, jako jsou dezinfekční prostředky nebo antibiotika. [123]

Prostředí, která mají tendenci k tvorbě biofilmů, jsou především povrchy vystavené vodě. Tvorba biofilmů však může nastat v různých oblastech, od kořenů rostlin až po lidské tkáně nebo lékařské přístroje implantované do lidského těla anebo klimatizační a filtroventilační systémy, včetně těch v letounech. [123]

Na rozdíl od planktonického životního stylu, kde mikroorganismy volně plavou ve vodě nebo jiném médiu, přichycený životní styl v biofilmu silně ovlivňuje většinu biochemických, genetických a fyziologických reakcí mikroorganismů. Život v biofilmu má proto několik typických rysů:

- mikroorganismy musí mít specifické orgány, aby dosáhly a přichytily se na povrch;
- mikroorganismy exprimují specifické geny, aby získaly určité produkty umožňující jejich dělení a proliferaci, čímž vytvářejí monovrstvu (struktura, která mikroorganismy chrání a stabilizuje jejich prostředí);
- specifické geneticky kódované mechanismy kontrolují tvorbu mikrokolonií (základní stavební bloky biofilmů a jejich tvorba je klíčovým krokem v procesu vzniku a šíření biofilmu);
- během života biofilm vytváří trojrozměrnou strukturu tvořenou mikroorganismy, které se seskupují do složitých, mnohdy věžovitých formací, což umožňuje biofilmům efektivněji kolonizovat povrchy a chránit se před nepříznivými podmínkami. [123]

Život takového biofilmu je pak velmi dynamický a jednotlivé buňky mohou být uvolňovány do prostředí. [123]

Například studie, která se zaměřila na přítomnost bakterií a tvorbu biofilmu provedená na komerčních letounech, která přistávala na mezinárodním letišti Zumbi dos Palmares v Maceió

Brazílii, prokázala ve vzorcích vzduchu odebraných z kabin letadel druhy bakterií *Staphylococcus*, včetně klinicky významných patogenů jako *Staphylococcus aureus* a *Staphylococcus epidermidis*. [124]

Při genetickém zkoumání izolátů těchto bakterií byly u *Staphylococcus epidermidis* zjištěny ICA lokusy, které jsou zodpovědné za produkci polysacharidů. Ty jsou klíčové pro tvorbu biofilmu. Samotný biofilm ale ve filtroventilaci nalezen nebyl. [124]

V rámci pokusu bylo zkoumáno 166 letounů včetně B 737-800, A 320, A 321, E 195 a ATR 72-600 (dvoumotorový turbovrtulový úzkotrupý dopravní letoun určený pro kratší regionální tratě vyráběný italsko-francouzskou společností Aerei di Trasporto Regionale - Avions de Transport Régional). [124]

4.6. Nošení masek jako ochrana proti biologickým agens

V rámci ochrany cestujících proti šíření biologických agens se hlavně v době pandemie covidu-19 uplatňovalo plošné nošení masek.

Studie zkoumající účinnost různých typů roušek a respirátorů (s americkou certifikací N95, chirurgické, jednorázové a látkové) při filtraci aerosolů s částicemi o různých velikostech zjistila, že N95 a chirurgické masky mají vyšší filtrační účinnost než jednorázové a látkové masky, zejména u částic menších než 1 μm . Dále bylo zjištěno, že filtrační účinnost masek se snižuje s rostoucí dobou nošení a objemem dýchání, přičemž hluboké dýchání (0,5 dm^3/s , tj. $5 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$) snižuje účinnost více než normální dýchání (0,25 dm^3/s , tj. $2,5 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$). Studie také ukazuje, že rouška s certifikací N95 a chirurgické masky mají podobnou účinnost při filtraci vdechovaných i vydechovaných částic, zatímco jednorázové a látkové roušky mají vyšší účinnost při filtraci vydechovaných částic. [125]

Roušky N95 mají v rámci evropské certifikace nejbližší k úrovni FFP2, kdy certifikace N95 požaduje filtrační účinnost alespoň 95 % pro částice o velikosti 0,3 μm nebo větší, zatímco FFP2 certifikace vyžaduje účinnost 94 % těchto částic. Pro úplnost informace, výrobky s FFP3 certifikací mají za stejných podmínek filtrační účinnost alespoň 99 %. V rámci pandemie covidu-19 byly doporučovány jako dostatečné prostředky s certifikací FFP2. [126][127][128]

V článku, který se zabýval automatizovaným systémem pro zkoumání účinnosti roušek,

respirátorů a jiných prostředků je uvedeno, že jejich účinnost se výrazně liší v závislosti na těsnosti a způsobu nasazení. Chirurgické roušky měly účinnost filtrace mezi 13 – 38%, zatímco respirátory N95 a FFP2 mezi 17 – 70% a respirátory FFP3 mezi 45.8 – 95.9%. Studie tak zdůrazňuje důležitost správného nasazení roušek pro dosažení maximální ochrany. Měření byla prováděna pomocí 4 laserových aerosolových spektrometrů, které detekují částice o velikosti mezi 0,25 a 35 μm . Každý spektrometr byl připojen k flexibilní plastové trubici, která byla umístěna buď u nosu nebo úst figuríny. [129]

V rámci experimentu zaměřeném na šíření aerosolů v kabině komerčních letounů, konkrétně modelů B 777-200 a B 767-300, jenž měl za cíl zjistit, jak se aerosoly šíří od simulovaného infikovaného pasažéra do dýchacích zón ostatních cestujících, bylo zjištěno, že nošení roušky výrazně snižuje množství aerosolů uvolňovaných do okolí. Při testech bylo prokázáno, že roušky poskytují významnou ochranu proti kapénkám o velikostech 0,3 μm , které byly uvolňovány z figuríny simulující kašel. S rouškou docházelo k redukci kapének více jak 90% oproti situaci, kdy rouška nebyla použita. Výsledky ukázaly, že roušky výrazně snižují riziko expozice aerosolům na sedadlech kolem figuríny. [130]

Experiment probíhal po dobu 8 dnů a zahrnoval jak testy letounu na zemi, tak testy během letu. Jako aerosol byl použit fluorescenční roztok s velikostí částic 1 - 3 μm a aerosol obsahující nukleovou kyselinu. Aerosoly byly uvolňovány z upravené figuríny, která byla umístěována na různá sedadla v různých řadách. [130]

Bylo provedeno více jak 300 pokusů, při kterých bylo uvolněno přibližně 180 milionů fluorescenčních stopovacích částic. Ke zjištění kontaminace povrchů bylo použito více jak 40 analyzátorů a sběračů typu Instantaneous Biological Analyzer and Collector. Měření probíhalo v reálném čase a celkem jich bylo provedeno více než 11 500. [130]

Studie zabývající se ochotou cestujících nosit roušky v letadlech během pandemie covidu-19 zjistila, že záměr cestujících nosit roušku je významně ovlivněn jejich postoji, deskriptivními normami (tj. chováním, které je běžné nebo typické v určité situaci nebo skupině lidí tedy to, co lidé obvykle dělají, a ne to, co by měli dělat), vyhýbáním se riziku a vyhledáváním informací. Tyto faktory se liší mezi jedinci různých věkových skupin a demografických charakteristik. Mladší cestující mohou mít jiné důvody pro nošení roušek než starší cestující, což naznačuje, že přístupy k nošení roušek nejsou jednotné. [131]

Dále studie zjistila, že demografické a cestovní charakteristiky, jako je věk, vzdělání, příjem a frekvence cestování, mohou předpovědět, zda je cestující ochoten zaplatit více za změnu letecké společnosti s jinou politikou k nošení roušek. To znamená, že některé skupiny cestujících jsou ochotnější investovat do bezpečnostních opatření než jiné. [131]

5. Výsledky

Na základě literární rešerše případů šíření infekčních agens (18x tuberkulóza, 81x chřipka, 26x SARS-CoV-1, 1x meningokoková infekce, 6x spalničky) a případů popsaných v kapitole 3.1 Přenos infekčních nemocí, jsme došli k závěru, že s výjimkou výše popsaných tří případů, kdy byly zdokumentovány přenosy infekce na vzdálenější místo, než odpovídá přímému přenosu aerosolu mezi cestujícími, jsou více méně přenosy z člověka na člověka na palubě letounů ve vzdálenosti přímého kontaktu. Velmi málo studií se věnovalo otázkám aerosolového přenosu infekcí v prostoru dopravního letounu.

Nejlépe popsány jsou pak 3 případy uvedené v této práci. Jedná se o šíření chřipky virem H1N1 (2 případy) a SARS-CoV-1 (1 případ). Z nich vyplývá, že k šíření došlo nejenom očekávanou cestou šíření, tj. přímou infekcí kapénkami od infekčních cestujících, ale i jinými. Bohužel není možné cesty šíření určit konkrétně. V úvahu tedy navíc připadají tyto:

- kontaktem s kontaminovaným povrchem;
- nepřímou infekcí kapénkami od infekčních cestujících.

Na základě studia popsaných případů tedy můžeme konstatovat, že k šíření nemocí na palubě letounů dochází i mimo přímé nakažení kapénkami od infekčních pacientů. Současně můžeme říci, že nelze vyloučit šíření aerosolů nepřímo. Jako jediná cesta tohoto šíření se pak nabízí filtroventilační systém letounu.

Tyto systémy, jak je popsáno v kapitolách číslo 4.2, 4.2.2 a 4.2.3, jsou vybaveny pouze HEPA filtry, jejichž poréznost je v rozsahu 100 – 300 nm (0,1 μ m – 0,3 μ m). Přestože některé studie popisují možnost zachycení menších částic a opírají o to své tvrzení, že HEPA filtry jsou schopny zachytit všechny viry, máme silné pochybnosti o pravdivosti těchto tvrzení a to vzhledem k tomu, že velikosti virů infikujících člověka jsou v rozsahu 25 – 300 nm (0,025 μ m – 0,3 μ m) viz Tabulka 8 a Tabulka 9. Většinu z nich by tedy sice měl HEPA filtr zachytit, ale prozovatelé a výrobci letounů, stejně jako výrobci filtrů, tvrdí že jsou zachyceny všechny bez rozdílu velikosti viz Tabulka 10 a Tabulka 13. Při laboratorním zkoumání filtrů by se pak mikroorganismy těchto velikostí měly na použitém HEPA filtru vyskytovat.

V rámci laboratorního zkoumání filtru, který byl měněn po 5 000 provozních hodinách. Byly

na jeho vstupní i výstupní straně nalezeny grampozitivní bakterie (dále jen G+), viz Tabulka 16 i gramnegativní bakterie (dále jen G–), viz Tabulka 17.

Tabulka 16 – Mikroorganismy zachycené na vstupních a výstupních straně HEPA filtru (G+)

Bakteriální druh	Vstupní strana	Výstupní strana
<i>Staphylococcus aureus</i>	-	zjištěno
<i>Streptococcus pyogenes</i>	zjištěno	zjištěno
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	-	zjištěno
<i>Enterococcus faecalis</i>	zjištěno	-
<i>Clostridium tetani</i>	-	zjištěno
<i>Clostridium perfringens</i>	-	zjištěno

Tabulka 17 – Výsledky laboratorního zkoumání HEPA filtru (G–)

Bakteriální druh	Vstupní strana	Výstupní strana
<i>Escherichia coli</i>	zjištěno	zjištěno
<i>Citrobacter spp.</i>	zjištěno	zjištěno
<i>Yersinia spp.</i>	-	zjištěno
<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	zjištěno	zjištěno
<i>Morganella morganii</i>	zjištěno	-
<i>Klebsiella ozaenae</i>	-	zjištěno
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	zjištěno

Jde o tyto patogenní bakterie:

- *Staphylococcus aureus* (G+) se běžně vyskytuje na kůži a na sliznicích nosohltanu. Může způsobit kožní infekce, jako jsou abscesy, impetigo, a vážnější onemocnění jako

je pneumonie, meningitida a endokarditida. Obvykle se nešíří vzduchem, ale může se šířit prostřednictvím kontaktu s kontaminovanými povrchy nebo přímým kontaktem s infikovanými osobami; [132]

- ***Streptococcus pyogenes* (G+)** způsobuje onemocnění jako je faryngitida, impetigo, šarlatová horečka, a vážnější infekce jako je nekrotizující fasciitida a streptokokový syndrom toxického šoku. Může se šířit vzduchem prostřednictvím respiračních kapének při kašli nebo kýchání; [132]
- ***Streptococcus pneumoniae* (G+)** se často vyskytuje v horních dýchacích cestách. Způsobuje pneumonii, meningitidu, sinusitidu, otitis media a sepsi. Může se šířit vzduchem prostřednictvím respiračních kapének; [132]
- ***Enterococcus faecalis* (G+)** se běžně vyskytuje v trávicím traktu. Může způsobit infekce močových cest, endokarditidu, bakteriemi a meningitidu a to zejména u lidí s oslabeným imunitním systémem. Obvykle se nešíří vzduchem, ale prostřednictvím kontaktu s kontaminovanými povrchy nebo zdravotnickými zařízeními; [132]
- ***Clostridium tetani* (G+)** je anaerobní bakterie, která způsobuje tetanus. Tato bakterie se běžně vyskytuje v půdě, prachu a výkalech zvířat. Když se spory *Clostridium tetani* dostanou do rány, mohou se aktivovat a produkovat silný toxin zvaný tetanospasmin. Tento toxin narušuje nervový systém a způsobuje bolestivé svalové křeče a ztuhlost, což je charakteristické pro tetanus; [132]
- ***Clostridium perfringens* (G+)** je anaerobní bakterie, která se vyskytuje v půdě a střevním traktu. Způsobuje potravinové otravy, plynovou gangrénu a nekrotizující enteritidu. Nešíří se vzduchem, ale prostřednictvím kontaminovaných potravin nebo ran. [132]
- ***Escherichia coli* (G+)** jsou fakultativně anaerobní bakterie, která se běžně vyskytuje v dolní části střev teplokrevných organismů, včetně lidí. Většina kmenů je neškodná a dokonce prospěšná, například tím, že produkuje vitamín K₂ a brání kolonizaci střev patogenními bakteriemi. Některé kmeny mohou způsobit těžké potravinové otravy, bolesti břicha, ztrátu chuti a horečku. V některých těžkých případech může dojít k selhání ledvin. Tyto bakterie se většinou přenášejí konzumací kontaminovaných

potravin, jako je syrové nebo nedostatečně tepelně upravené maso, nepasterizované mléko a kontaminovaná zelenina. Přenos vzduchem je méně běžný. [132]

- ***Citrobacter spp. (G–)*** je rod gramnegativních, fakultativně anaerobních bakterií, které se běžně vyskytují v půdě, vodě, odpadních vodách a ve střevním traktu lidí a zvířat. Pokud se vyskytnou v močových cestách, mohou způsobit jejich infekci. Dále způsobují gastroenteritidu, bakteriemii a meningitidu. Jejich přenos se děje prostřednictvím kontaminovaných potravin nebo vody, přímým kontaktem s infikovanými osobami nebo prostřednictvím zdravotnického personálu v nemocnicích. Vzduchem se většinou nepřenáší. [132]
- ***Yersinia spp. a Yersinia pseudotuberculosis (G–)*** je gramnegativní bakterie, která způsobuje onemocnění známé jako yersinióza, která se projevuje zahrnují horečku, bolesti břicha, průjem, který může být vodnatý nebo krvavý, a zánět lymfatických uzlin. Tato bakterie se přenáší především prostřednictvím kontaminovaných potravin nebo vody, zejména syrového nebo nedostatečně tepelně upraveného masa. Infekce může také nastat při kontaktu s infikovanými zvířaty nebo jejich výkaly. Přenos vzduchem není vyloučený, ale je velmi ojedinělý. [132]
- ***Morganella morganii (G–)*** jsou součástí normální střevní mikroflóry lidí a zvířat. Může způsobovat nozokomiální infekce, jako jsou infekce močových cest, pooperační rány, a další infekce u pacientů s oslabeným imunitním systémem. Nejčastěji se šíří kontaktem s kontaminovanými povrchy nebo lékařskými zařízeními, jako jsou katétry. [132]
- ***Klebsiella ozaenae (G–)*** je rod, který se vyskytuje ve vodě, půdě a v trávicím traktu lidí a zvířat. Může způsobovat nozokomiální infekce, jako jsou pneumonie, infekce močových cest, a meningitidy, zejména u pacientů s oslabeným imunitním systémem. Šíří se kontaktem s kontaminovanými povrchy nebo zařízeními, kontaminovanými potravinami nebo kontaminovanou vodou nebo půdou. V prostředí, kde je vysokým množstvím bakterií se může šířit kapénkami, typicky nemocnicích. [133][134]

V HEPA filtru jsme nepředpokládali zachyt virů v takovém množství, aby je bylo možné kultivovat, proto jsme se soustředili na průkaz jejich nukleové kyseliny. Testy prováděné na

použitém HEPA filtru vyšly v multiplexním testu negativní. Vzhledem k tomu, že stejnými testy lze prokázat i některé bakterie, které na filtru zachyceny byly, lze předpokládat, že viry HEPA filtrem projdou.

Z výsledků laboratorního zkoumání HEPA filtrů vyplývá, že mikrobiální kontaminace HEPA filtrů je možná. Překvapivě bylo zjištěno, že bakterie se nachází nejenom na vstupní, ale i na jeho výstupní straně, která by měla být čistá. Je tedy podezření, že při dlouhodobém provozování tohoto filtru nemusí dojít k udržení efektivní funkce po celou dobu jeho životnosti. Tím pádem může být kontaminovaný filtroventilační systém a přispívat k šíření nemocí. A na základě těchto výsledků jsme přistoupili k pilotnímu projektu popsánému v kapitole 4.3.2. Z nichž jsme získali níže uvedené výsledky.

Výsledky z prvního testování HEPA filtru a uhlíkového filtru, před osazením HEPA filtru nanotextilií, jsou uvedeny viz Tabulka 18.

Tabulka 18 – Výsledky použitého HEPA filtru čističky vzduchu

Typ vzorku	Zachycen
HEPA filtr (vstupní část)	-
HEPA filtr (výstupní část)	Rhinovirus, Enterovirus
Uhlíkový filtr	HCoV – 229 E

Rhinoviry jsou hlavní příčinou běžného nachlazení, které se projevuje rýmou, kýcháním, bolestí v krku a mírnou horečkou. Rhinovirus může také způsobit závažnější onemocnění, zejména u lidí s oslabeným imunitním systémem nebo astmatem. [135]

Enteroviry způsobují různé infekce u lidí a zvířat. Jsou velmi rozmanité, s více než 100 různými typy. Mezi hlavní skupiny patří:

- polioviry způsobující poliomyelitidu;
- coxsackieviry, které mohou vést k onemocněním jako herpangina a syndrom ruka-noha-ústa u dětí;
- echoviry, jež jsou příčinou meningitidy a vyrážek
- enteroviry 68 až 71, které jsou původci respiračních onemocnění a encefalitidy.

Enteroviry se šíří hlavně fekálně-orální cestou, ale také kapénkami. [135]

Vzhledem k zachytu koronaviru z uhlíkového filtru na výstupu jsme zařadili experiment s nanotextilií. Jeho výsledky jsou uvedeny v Tabulka 19.

Tabulka 19 – Výsledky samotné nanotextilie v čističce vzduchu

Typ vzorku	Zachycen
Nanotextilie (vstupní část)	<i>Acinetobacter baumannii</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Serratia marcescens</i> <i>Staphylococcus aureus</i> Koronavirus

Z uvedených nejsou v této práci ještě popsány:

- ***Acinetobacter baumannii* (G–)** jsou bakterie, která mohou způsobovat nozokomiální infekce, zejména u lidí s oslabeným imunitním systémem. Tyto bakterie jsou známé svou odolností vůči antibiotikům a schopností přežívat v nemocničním prostředí. Můžou způsobovat infekce krve, močových cest, plic (pneumonie) a ran. [132]
- ***Serratia marcescens* (G–)** jsou bakterie z čeledi Yersiniaceae. Jedná se to fakultativní anaerobní a oportunní patogen u lidí. Jsou často spojovány s nemocničními infekcemi, jako jsou infekce močových cest, infekce ran a katéetrová bakteriémie. Vyskytují se ve vlhkých prostředích, například v koupelnách, kde se projevují jako růžový nebo oranžový slizký povlak. [132]
- **Koronaviry** jsou velká rodina obalených RNA virů, které mohou způsobovat onemocnění u lidí i zvířat. U lidí mohou způsobovat různé respirační infekce, od běžného nachlazení až po závažnější onemocnění, jako je MERS a SARS. Mezi běžné lidské koronaviry patří HCoV-229E, HCoV-NL63, HCoV-OC43 a HCoV-HKU1. [135]

Výsledky z poslední části experimentu, kdy byl nový HEPA filtr čističky vzduchu osazena nanotextilií a byl proveden kontrolní výtěr osoby, která se v přítomnosti čističky vyskytovala viz Tabulka 20.

Tabulka 20 – Výsledky pilotního projektu

Typ vzorku	Zachycen
HEPA filtr (vstupní část)	Adenovirus
HEPA filtr (výstupní část)	-
Nanotextilie, vzorek č. 1	HCoV-229E
Nanotextilie, vzorek č. 2	HCoV-229E
Nanotextilie, vzorek č. 3	HCoV-229E
Osoba	HCoV-229E

Bylo zjištěno, že na HEPA filtru byl zachycen **adenovirus**. Ten může způsobovat mírné až závažné infekce v různých částech těla. Existuje asi 50 typů adenovirů, které se v prostředí běžně vyskytují a mohou infikovat dýchací cesty, oči, střeva, močové cesty a nervový systém. Příznaky infekce adenovirem závisí na tom, kterou část těla virus infikuje. Mezi běžné příznaky patří kašel, horečka, rýma, bolest v krku, zánět spojivek (růžové oko), průjem a bolest břicha. Adenoviry se šíří hlavně kontaktem s infikovanými osobami nebo kontaminovanými povrchy a mohou se také šířit vzduchem prostřednictvím kapének, zejména v přeplněných prostředích, jako jsou školy, nemocnice a vojenské základny. [135]

Na nanotextilii se adenovirus nevyskytl, tudíž jej HEPA filtr zachytil. Tomu odpovídá i to, že adenovirus nebyl na výstupní části HEPA filtru nalezen. Naopak na nanotextilii byl nalezen **koronavirus HCoV-229E**, který zjevně pocházel z osoby pohybující se v jeho blízkosti. Jedná se o druh lidského koronaviru, který patří do rodu Alphacoronavirus. Tento virus je obalený, pozitivně orientovaný, jednovláknový RNA virus, který infikuje lidi. Způsobuje běžné nachlazení. Příznaky mohou zahrnovat rýmu, kašel, bolest v krku, horečku, bolest hlavy a celkovou únavu. Virus se šíří hlavně prostřednictvím kapének, které se uvolňují při kašli nebo kýchání infikované osoby. Může se také šířit kontaktem s kontaminovanými povrchy a následným dotykem úst, nosu nebo očí. [135]

Z výše uvedeného je možné soudit, že pokud bychom chtěli zlepšit účinnost filtroventilace letounů B 737 a A 320 family, osazenou HEPA filtry, bylo by vhodné ji doplnit o filtry z nanotextilií. Ke stejným závěrům došly i studie zkoumající filtrování částic o průměru menším než 2,5 μm v budovách, která je zmíněna v kapitole 4.4.1 Nanotextilie.

5.1. Návrh zařízení

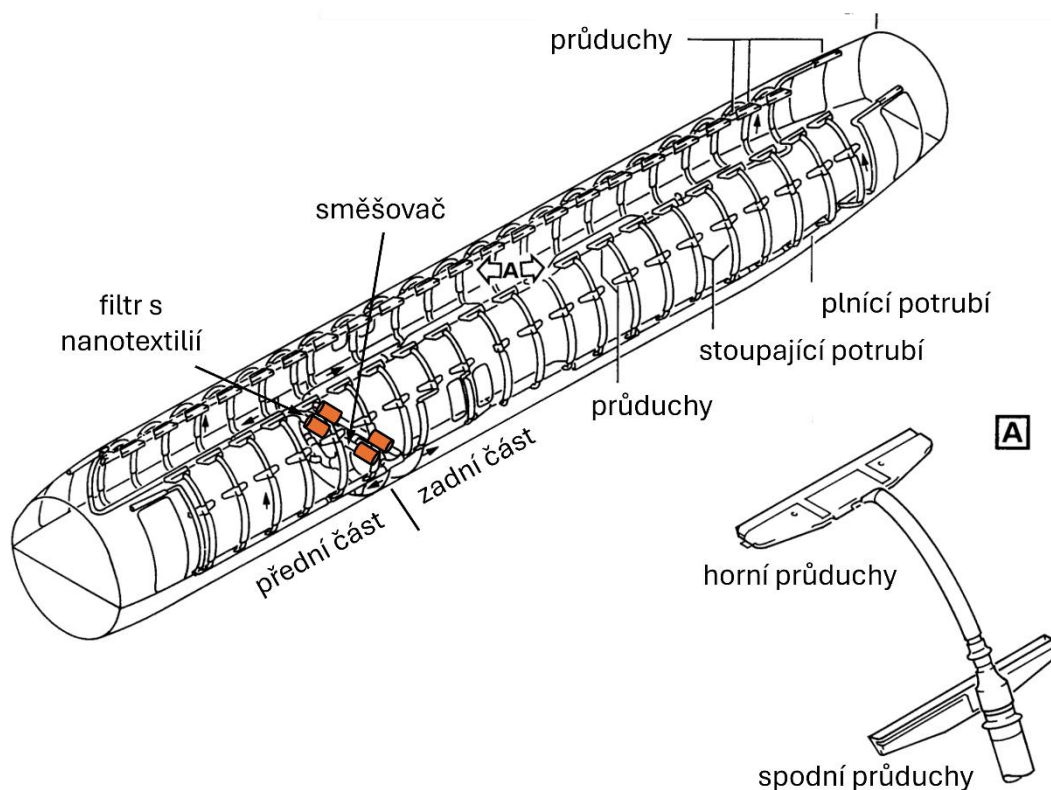
Nejprve je potřeba určit umístění filtrů s nanotextilií ve filtroventilačním systému letounů. Vzhledem k tomu, že slouží k zachycení biologických agens, měly by být umístěny co nejbližší kabině, aby nedocházelo ke kontaminaci filtroventilačního vedení za nimi. Současně by měly být na takovém místě, aby se eliminovalo použití velkého množství těchto filtrů a aby umožňovalo snadnou výměnu, která může být častá.

Je potřeba zdůraznit, že součástí filtroventilačního vedení musí být stále HEPA filtry, u nichž předpokládáme odfiltrování větších agens. Nanotextilní filtr je potřeba umístit za ně, tj. za jejich

výstupní část směrem ke kabině, jinak by tyto agens zahltili nanotextilií. Teprve menší částice, které HEPA filtrem projdou, budou navrhovaným filtrem zachycovány.

U letounů řady A 320 family je v podstatě možné uvažovat pouze o osazení širokých distribučních trubek za směšovačem letounu, viz Obrázek 34. Bohužel se tak nesplní požadavek, aby byly filtry s nanotextilií co nejdál ve vedení, ale vzhledem ke způsobu distribuce by toto bylo možné pouze, pokud by se filtry osadilo každé rameno, viz Obrázek 34, písmeno A. To by byl významný zásah do systému distribuce vzduchu, který by mohl přinášet, kromě zvýšení nákladů i výrazné tlakové ztráty. Filtry s nanotextilií sice mají velmi příznivý tlakový spád, ale v takovém množství by již mohl být součet jejich odporů příliš vysoký. Pro letouny typu A 320 family bychom tedy potřebovali 4 filtry s nanotextiliemi.

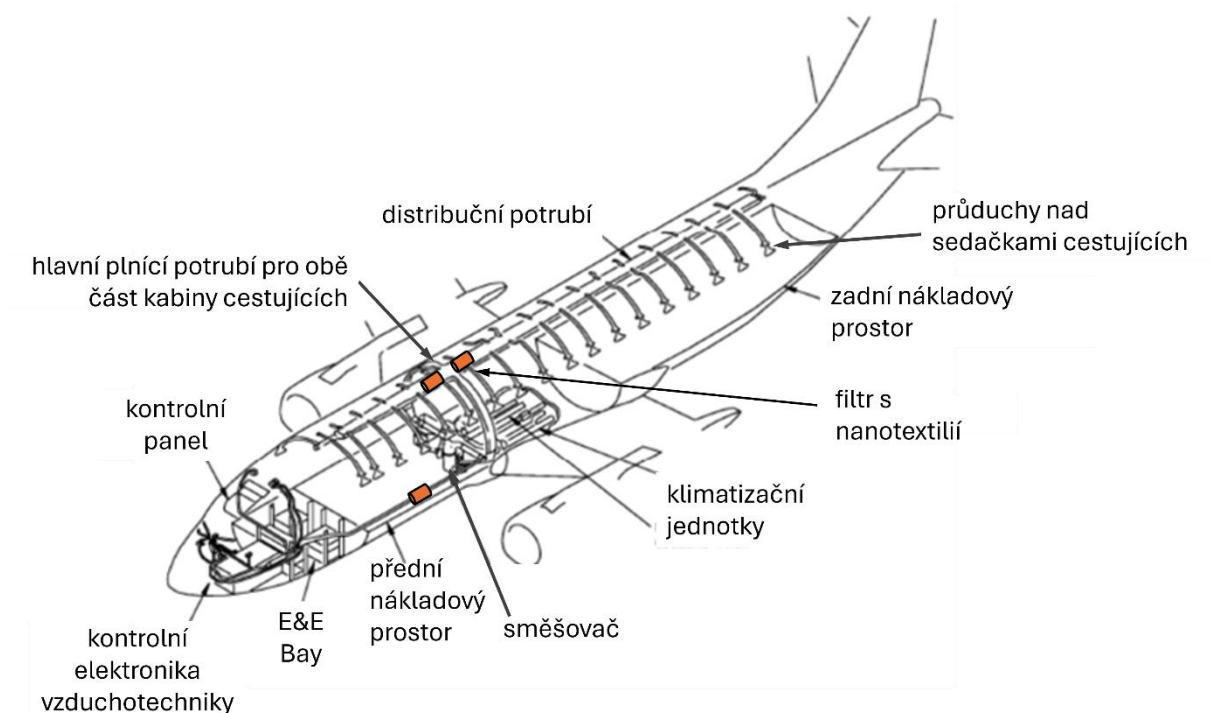
Obrázek 34 – Osazení letounů A 320 family nanotextilními filtry



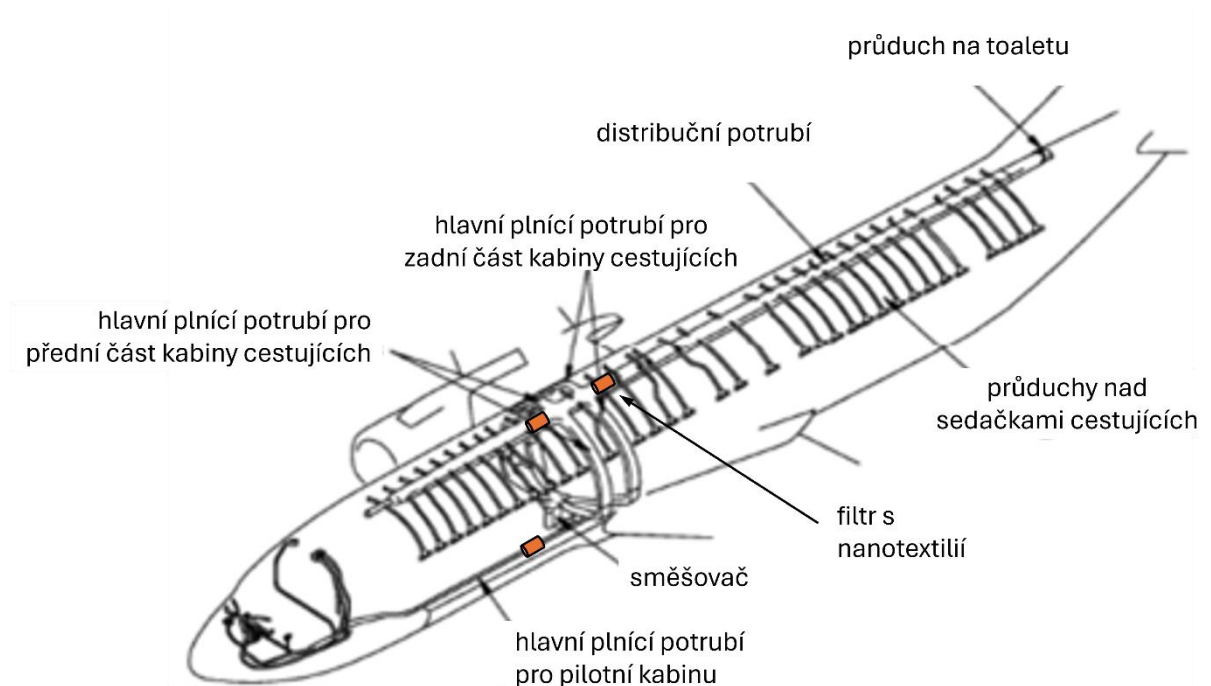
U letounů řady B 737 je situace příznivější. Jsou tu možné dvě varianty, které se liší s osazení vzduchové větve potrubí zásobující kabinu cestujících. Větev, která distribuuje vzduch do pilotní kabiny by byla osazena filtrem vždy stejně. První varianta (Varianta A), úspornější na počet filtrů, ale pravděpodobně náročnější na konstrukci a údržbu, by spočívala v umístění

nanotextilních filtrů do distribučního potrubí pod stropem letounů. Vzhledem k tomu, že jsou zde v pravidelných intervalech vyvedeny odbočky k distribuci vzduchu k sedadlům, musel by se filtr vměstnat mezi odbočky nebo by musely být odbočky vedeny jinak. Toto řešení má také tu výhodu, že je shodné jak pro krátké, tak dlouhé varianty letounů B 737. Nemuselo by se tak mezi nimi rozlišovat, viz Obrázek 35 a Obrázek 36.

Obrázek 35 – Osazení krátkých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta A)



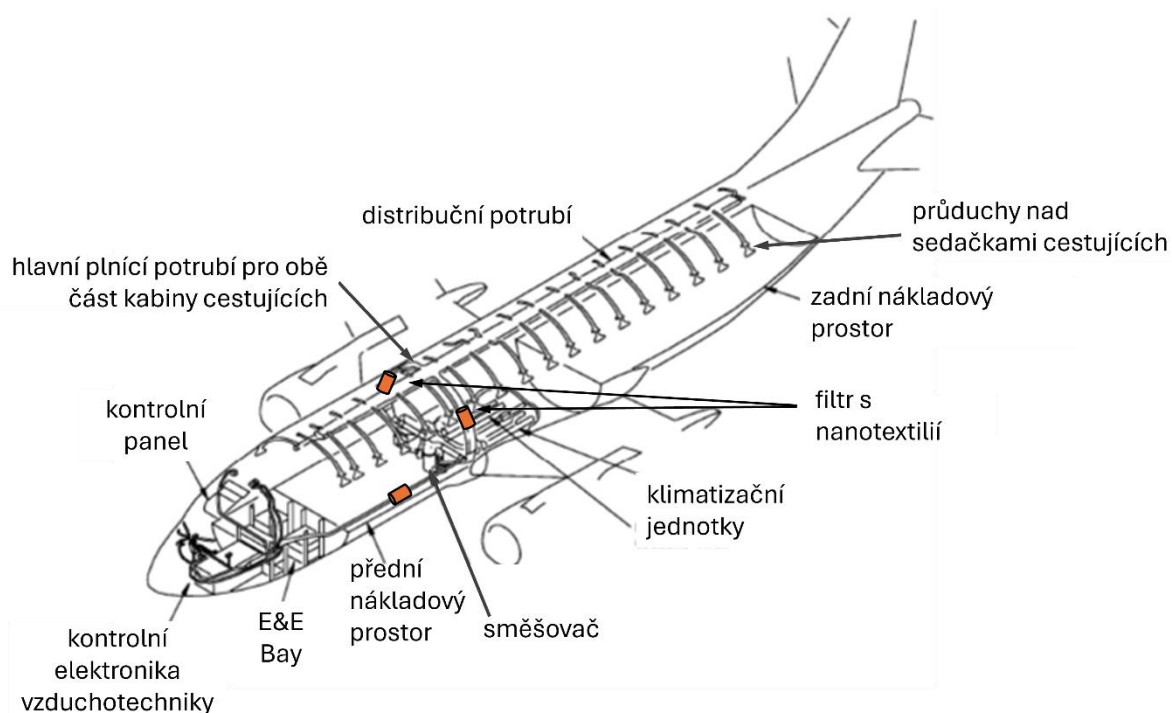
Obrázek 36 – Osazení dlouhých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta A)



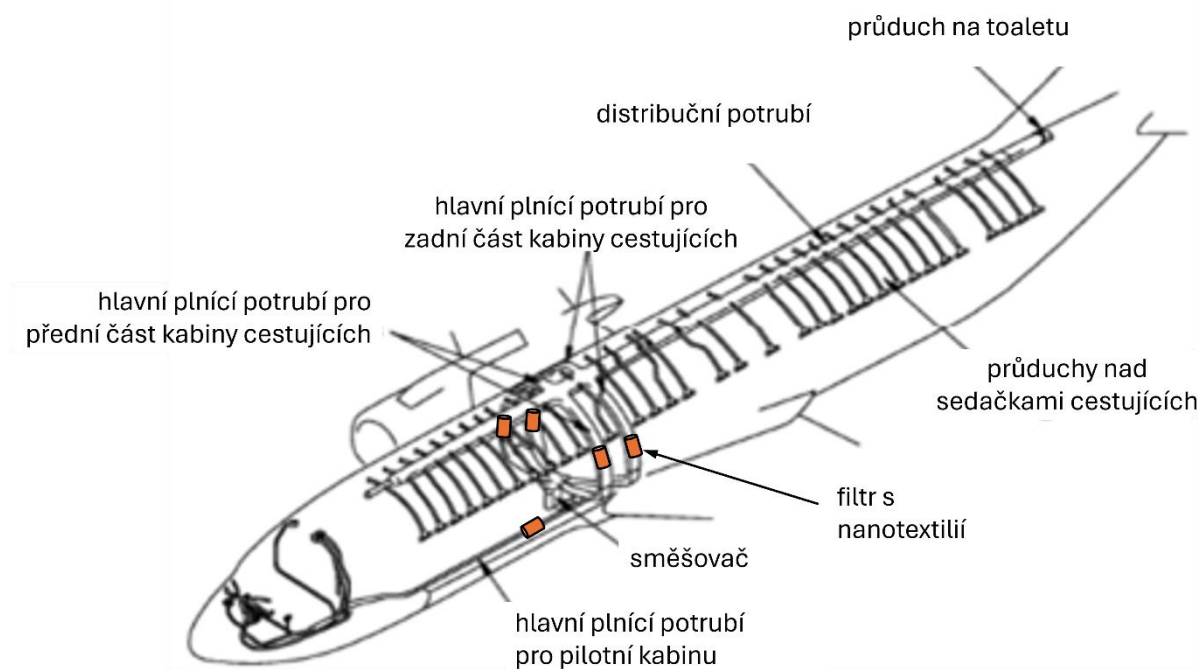
Druhá možnost (varianta B), která se jeví jako jednodušší na instalaci i údržbu, ale náročnější na množství filtrů u dlouhých variant letounů B 737, spočívá v instalaci nanotextilních filtrů do

stoupajícího distribučního potrubí, viz Obrázek 37 a Obrázek 38.

Obrázek 37 – Osazení krátkých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta B)



Obrázek 38 – Osazení dlouhých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta B)



Ve všech případech by museli být filtry uloženy za ostěním letounů a pod podlahou jejich palub s přístupem z nákladového prostoru.

Jak bylo uvedeno v kapitole 4.4.2 Nanotextilie s možností samostatné dezinfekce, životnost filtru lze prodloužit jeho dezinfekcí. V uvedené kapitole se nabízí tři řešení:

- ultrafialová fotokatalytická oxidace;
- dezinfekce teplem;
- nanostříbro.

Dezinfekce ultrafialovou fotokatalytickou oxidací se jeví jako nejméně vhodná. Prvním důvodem je nutnost přivedení elektrické energie k filtru, viz dále. Větší komplikací jsou ale produkty této metody. Ty totiž mohou být toxické a bylo by nutné je preventivně odvádět, tedy vymyslet další systém trubek a pohon vzduchu v nich, případně se napojit na stávající ventilaci avioniky. A ani kdyby se přistoupilo na toto opatření, nebude nikdy zcela vyloučeno, že tyto produkty neuniknou do kabiny cestujících. Další komplikací této metody je případná změna vlhkosti a tlaku, která může ovlivnit její účinnost. V neposlední řadě by se nejednalo pouze o filtr s nanotextilií, ten by byl de facto marginální částí, protože většinu konstrukce zařízení by zabral reaktor umožňující ultrafialovou fotovoltaiickou oxidaci. Vzhledem k tomu, že instalace bude náročná i na prostor, je to další komplikace.

Celkově lze tedy říci, že tato technologie může být použita, ale je třeba pečlivě zvážit výše uvedené faktory a provést další výzkum a testování, aby byla zajištěna bezpečnost a účinnost této technologie v konkrétních případech.

Další uvedenou variantou je dezinfekce teplem. Jak je zmíněno v kapitole 4.4.2 Nanotextilie s možností samostatné dezinfekce, mělo by být toto zařízení schopné likvidovat většinu uvažovaných virů, protože dosahuje teploty vyšší, než jsou dohledané teploty pro jejich likvidaci.

Tak jako při předchozím řešení je potřeba zařízení připojit ke zdroji elektrické energie. Konkrétně ke stejnosměrnému proudu s napětím 12 V. Stejnosměrné napětí pro různé systémy řídicích a ovládacích systémů letounů se na uvažovaných palubách vyskytují, ale s vyšším napětím. Současně je všeobecně známo, že jsou na palubách často instalovány zařízení, která

pracují s nižším napětím, typicky dotykové obrazovky multimediálních zábavných systémů integrovaných do sedaček. Neměl by být tedy velký technologický problém napětí snížit na požadovaných 12 V. Přívodní kabely pak mohou využívat již stávající cesty.

Poslední varianta, tj. použití nanostříbra jako součást nanotextilních filtrů je z pohledu požadavků na jiné systémy nejméně náročná, protože není potřeba žádného dalšího zařízení kromě filtru samotného. Proto budeme dále pracovat s tímto řešením.

Vzhledem ke zjištěným skutečnostem by měl být filtr samotný řešen jako trojvrstvý s větší mocností jednotlivých vrstev a dále s tím, že jedna vrstva by obsahovala uvedené nanostříbro. Otázkou je jeho umístění. V případě HEPA filtrů se bavíme o našroubování na výstupní konec vedení. To je ideální jak kvůli instalaci nových filtrů, tak kvůli zajištění dostatečné těsnosti spoje, aby nedocházelo k přísávání vzduch mimo filtr.

Nanotextilní filtr je ale potřeba umístit do vzduchového vedení. Jako nejvhodnější řešení se tedy jeví jakási komora, ať již kvadratická nebo válcová, se vstupními dvířky, do které bude z jedné strany přiváděn vzduch a ze které bude přes filtr na druhé straně vystupovat. Velikost komory pak budou ovlivňovat tyto faktory:

- možnost manipulace s filtrem uvnitř komory, aby bylo možné jej vyměnit;
- tlakové ztráty, které komora a prostor okolo ní způsobí, protože je potřeba zajistit dostatečný výkon filtroventilačního systému pro výměnu vzduchu v kabině;
- těsnost komory a to jak na filtru, tak u vstupních dvířek, aby nedocházelo k tlakovým ztrátám nebo naopak přísávání nefiltrovaného vzduchu.

Navrhovaný způsob řešení těchto bodů je:

- Manipulaci uvnitř komory je možné řešit pomocí přípravku, tj. speciálního nástroje navrženého pouze k tomuto úkonu. Do něj by mělo být možné filtr uchytit, vložit do komory a instalovat. K výměně tak nebude nutné používat ruce. To přinese i snížení možnosti poškození filtru a zachování jeho čistoty po aplikaci do komory.
- Tlakové ztráty komory se dají omezit její velikostí, tzn. čím menší bude, tím se rychleji docílí potřebného tlaku. V podstatě pak bude fungovat jako vzdušník a v optimálním

případě bude pomáhat vedení ve vyrovnávání tlakových ztrát. Pokud by komora byla příliš velká a systém by měl problém ji natlakovat, projeví se to na množství vyměněného vzduchu. Pokud by její plnění bylo na možné kapacitě systému, jakýkoliv pokles tlaku v komoře by se projevil na účinnosti výměny vzduchu. Tlakové ztráty na samotném filtru jsou vyřešeny použitým materiálem. Jak bylo v práci několikrát zmíněno, nanotextilní filtry mají malý tlakový spád.

- Co největší těsnosti u samotného filtru můžeme dosáhnout tím, že filtry budou uchyceny šroubením nebo bajonetovým závitem. Nejslabším místem, kde může docházet k netěsnosti v rámci vzduchového vedení jsou dvířka komory. Zde je potřeba se zamyslet nad způsobem výměny filtru. Pokud by jeho životnost byla dostatečně dlouhá, mohla by se výměna provádět s velkou periodou a pak by měla být dvířka přichycena šrouby. Celé zařízení by tak bylo možné schovat za ostění kabiny nebo nákladního prostoru. V tomto případě je vhodné zvolit válcový tvar, protože bude lépe kopírovat stávající potrubí. Pokud by se uvažovalo o častější výměně, je potřeba aby byla dvířka přístupná z prostoru kabiny nebo nákladového prostoru, tzn. že by měla být vidět. Pro tento případ je vhodné, aby byla dvířka na závěsech a proti nim uzavřena pomocí manžet. Takové řešení bude vyžadovat kvadratický tvar, protože se na něj budou dvířka lépe tvarovat, a tím budou i lépe doléhat. Další výhodou tohoto tvaru je, že se dvířka budou lépe komponovat do ostění. V obou případech ale bude potřeba, aby byla dvířka osazena pryžovým těsněním. To se v případě častější výměny může vymákat a ztratit své izolační vlastnosti. Je tedy potřeba těsnění připevnit tak, aby se dalo lehce měnit. Nejjednodušším způsobem je jeho nalepení na dvířka nebo komoru. Při tomto řešení bude vhodné zvolit pevné, ale lehce odstranitelné lepidlo, např. silikonové nebo kontaktní.

Zařízení pro filtraci vzduchu by tedy mělo sestávat z kompaktní komory s dvířky, které budou zajišťovat těsnost. Samotný nanovláknový filtr by měl být třívrstvý s minimálně jednou vrstvou s obsahem nanostříbra. Filtr je vhodné v komoře uchytit šroubením. V ideálním případě by měl být filtr o průměru odvodní trubky vzduchu a samotná komora by neměla být o moc větší. Návrh komory viz Přílohy.

6. Diskuse

Prvním z cílů práce bylo určení, zda došlo k případům šíření infekční nemoci v letounu, které by nasvědčovaly jako jednu z cest šíření nemoci filtroventilací. Toto je možné z popsaných případů uvedených v kapitole 3.1 Přenos infekčních nemocí považovat za prokázané. Je ale nutné zdůraznit, že v žádném zdroji není tento přenos zmíněn jako jediný možný. Z popsaných dějů, ale vyplývá, že jej v žádném případě nelze vyloučit.

Pokud zohledníme na konstrukci letounů a filtroventilačního systému, je zřejmé, že k šíření biologických agens filtroventilační systém přispívá i tím, že vytváří suché prostředí, ve kterém vysychají sliznice. Ty jsou pak náchylnější k infekcím, což je výrazný faktor pro šíření nemocí v letounech. Dále systém vytváří proudění vzduchu, které omývá více osob. Toto proudění je laminární, takže nedochází k šíření vzduchu podélně trupem letounu, ale jenom do okolních sedaček. Riziko přenosu patogenů vzduchem je tedy pravděpodobně největší v sousedních řadách od infekčního cestujícího, i když studie pracující s výpočetními modely prokázaly šíření kapének až do vzdálenosti sedmi řad během 4 minut.

Do proudění vzduchu je také potřeba zahrnout samotné cestující, kteří procházejí kabinou. Nejenom, že se mohou vystavit biologickým agens z infekčního cestujícího nebo z výdechu filtroventilace, ale současně mohou vzduch vířit a zanášet agens tam, kde by se jinak nevyskytlo.

Je tedy zjevné, že pohyb vzduchu, a s ním spojené šíření biologických agens, na palubě letounu je komplikovaný a komplexní mechanismus, jehož popsání není jednoduché a může jej ovlivňovat velká řada faktorů. Filtroventilace by tak z něj neměla být vynechána, což se může stát v rámci výrobci deklarované schopnosti HEPA filtrů zachytit většinu bakterií a virů.

Tato schopnost vychází z postupu pro certifikaci HEPA filtrů, který pracuje s částicí o velikosti 0,3 μm , což je velikost částice s nejlepší prostupností tímto typem filtrem. I přes deklarovaný vysoký záchyt těchto částic to ale neznamená, že by menší částice, byť s vysokou mírou zachycení, nemohly filtrem projít. V našem pokusu jsme například zjistili, že na výstupní stranu filtru pronikl *Staphylococcus aureus* o velikosti 1 μm . Pokud tedy výrobci filtrů i letadel tvrdí, že bakterie a viry jsou HEPA filtry zachyceny, měli by tak činit na základě experimentálního ověření s těmito agens nebo s částicemi o různých velikostech, a to nejlépe

v provozu. Další otázkou je totiž to, jak se bakterie po zachycení na filtru chovají, protože se nejedná o neživé částice, viz dále v této kapitole.

Pokud bychom chtěli zhoršit podmínky pro přenos biologických agens na palubě letounů, tak se zdá jako nejjednodušší a nejrychlejší způsob zavedení nošení roušek nebo respirátorů pro všechny cestující i palubní personál. Takové opatření je velmi náročné vymáhat u všech cestujících. V principu je to možné jenom tehdy, pokud je vyhlášen krizový stav, a letecké společnosti mají oporu v právních předpisech. Výzkumy také hovoří o tom, že aby byla ochrana úst a nosu plně funkční, musí být ochranné pomůcky řádně nasazeny. Způsob dýchání a délka nošení také ovlivňuje jejich funkci a to nezmiňujeme případy, kdy člověk takovou ochranu na obličeji nesnese, protože je např. astmatik. Vhodnější je proto preventivně zajistit celý systém proti šíření biologických agens. Předtím je ale potřeba určit reálnou účinnost stávajících filtroventilačních systémů.

To nás přivádí k druhému stanovenému cíli práce a tím je laboratorní zkoumání použitého filtru z letounu A 320 family, konkrétně A 319. Uvedený výsledek tohoto výzkumu je zajímavý hned z několika důvodů.

Předně, byly zachyceny jiné bakterie na vstupní a výstupní straně filtru. Dokonce bylo zachyceno více druhů bakterií na výstupní straně. Důvodem může být to, že vzorky nebyly odebrány z proti sobě ležících míst. Na vstupní straně filtru se tak bakterie mohly vyskytovat, ale nebyly při stěrech zachyceny. Tomu by odpovídal i fakt, že výstupní plocha filtru je menší, než vstupní a byla tak, při stejném počtu stěrů, větší pravděpodobnost bakterie zachytit. Dále je otázka, zda uvnitř filtru nejsou stálejší a vhodnější podmínky pro přežití bakterií a to jak stran teploty, tak především vlhkosti. Bylo by proto zajímavé provést měření teploty a vlhkosti v různých fázích letu nebo při stání letounu na stojánce.

Znepokojující je pak skutečnost, že se vůbec bakterie na výstupní straně filtru vyskytují. To může být způsobeno tím, že bakterie, které ulpí na HEPA filtru po zachycení přežívají. Pokud by pak byly schopny vytvářet kolonie, které by prorůstaly na výstupní stranu filtru, mohly by se tak dostávat na druhou stranu. Případně se v rámci průchodu filtrem mohou bakterie zachytit až na druhé vrstvě textilie a přežívat zde. Důsledkem jejich přítomnosti na výstupní straně filtru nicméně může být to, že bakterie budou strhávány z filtru do filtroventilačního systému, kde mohou potenciálně vytvářet biofilm nebo být dále odváděny s proudem vzduchu do kabiny.

Pokud by pak byly některé bakterie schopny vytvářet biofilm, jednalo by se o výrazné negativní zjištění, které by mělo vést k novým úvahám, jak tomuto jevu zamezit. Schopnost bakterií v biofilmu odolávat dezinfekčním prostředkům a antibiotikům z nich totiž činí výrazné potenciální riziko pro zdraví cestujících, protože by se nejednalo o přísátí bakterií z externího zdroje, který letoun opustí. Tento zdroj by byl trvalý, odolný a biologická agens by produkoval sám o sobě. Bylo by ale potřeba biofilm ve filtroventilaci prokázat.

Nalezené bakterie pak obsahují zajímavé spektrum. Jedná se jak o bakterie, které se mohou šířit vzduchem prostřednictvím kapének (*Streptococcus pyogenes* a *Streptococcus pneumoniae*), tak těch, které se vyskytují na kůži, ve střevním traktu lidí a zvířat nebo v půdě. První skupina bakterií nasvědčuje tomu, že filtry mohou být kontaminovány cestujícími z paluby. Jak si ale vykládat druhou skupinu bakterií, když se při vyjímání, skladování a laboratorních pracích s filtry postupovalo tak, aby nedošlo k sekundární kontaminaci?

Možné odpovědi jsou dvě. U bakterií, které se vyskytují u zvířat mohlo dojít k zanesení filtru z nákladového prostoru, kde se přepravují. Zvířata jsou dávána do přední části kabiny, která je vyhřívána vzduchem odváděným z E&E Bay a ostatních elektronických zařízení. Teplý vzduch pak může proudit dál do kabiny a unášet s sebou tyto bakterie, které jsou následně nasáty na konci předního nákladového prostoru.

Jak si ale vysvětlit přítomnost bakterií pocházejících z lidí? Odpověď je pravděpodobně opět v proudění vzduchu. Tentokrát ale z kabiny cestujících. Jak již bylo řečeno, čerstvý vzduch je přiváděn ke stropu kabiny cestujících, odkud padá do nákladového prostoru skrze podlahu. Ta je pokryta kobercem z umělé hmoty, do kterého se vytírají podrážky cestujících. Podrážky mohou být kontaminovány různými bakteriemi a chůzí nebo jiným pohybem mohou být bakterie uvolňovány do vzduchu a dostávat se do nákladového prostoru s prachem a k filtrům. Kontaminace podrážek může být pak před letem vysoká například kvůli delšímu čekání na odlet, která je spojena s kumulací velkého množství lidí na jednom místě a návštěvami společných toalet. Letištní haly a čekárny jsou typické průchodem velkého množství lidí.

Co se záchytu virů na HEPA filtru týče, ten nebyl našim zkoumáním prokázán. Na filtru nebyla nalezena specifická nukleová kyselina žádného ze zkoumaných virů, která by přítomnost viru dokazovala. To může být samozřejmě opět způsobeno náhodným odběrem vzorků a prostým faktem, že viry prostě nebyly nabrány. Z charakteristik filtrů a některých zdrojů ale vyplývá, že

i přes deklarování výrobců filtrů, nemají HEPA filtry pro zachyt virů velkou účinnost.

Zde se již dotýkáme třetího cíle a to je zkoumání HEPA filtru a nanotextilie v čističce vzduchu. Při zkoumání dlouhodobě používaného filtru byla zjištěna přítomnost virů na jeho výstupní straně, tj. straně. Důvod může být stejný jako u hypotézy přítomnosti bakterií na výstupní straně HEPA filtru z letounu A 319. Buď při vzorkování náhodným výběrem nebyly viry zachyceny nebo je filtr zachytil až svou poslední vrstvou. Viry jako takové nejsou živé, takže tvorbu kolonií a vlastní replikaci nemohou provádět. K tomu potřebují cizí buňku. Hypotéza, že by tvořily kolonie nebo biofilm a prorůstaly filtrem je tedy nereálná.

Pokus se samostatnou textilií přinesl potvrzení toho, že tento materiál dokáže účinně zachytit jak bakterie, tak viry. Byly zachyceny především bakterie než viry. To je dáno hlavně tím, že použitý multiplexní panel, na rozdíl od ostatních použitých, byl rovněž zaměřen na bakterie. Nicméně byl prokázán také záchyt koronaviru. Použití nanotextilie jako filtračního materiálu se tedy i experimentálně prokázalo jako vhodné.

Při posledním experimentu byla v rámci možností nasimulována uvažovaná situace, kterou se tato práce zabývá, tj. efektivita filtroventilace v částečně uzavřeném prostoru se zdrojem biologických agens (člověk) uvnitř. S tím, že na čistícím zařízení (čističce vzduchu) bylo aplikováno uvažované řešení pro zlepšení účinnosti, tedy nanotextilie. Při tomto pokusu se experimentálně prokázalo, že zdroje hovořící o zlepšení účinnosti HEPA filtru měly pravdu. I přesto, že při tomto, tak i předchozím experimentu, byl prokázán záchyt virů na HEPA filtru, nedošlo na něm k zachytu patogenu ze zdroje (člověk). Nanotextilie ale zafungovala velmi dobře. Patogen, tj. koronavirus HCoV-299E byl zachycen na všech vzorcích.

Posledním cílem této práce bylo navrhnout řešení pro zlepšení filtroventilace letounů A 320 family a B 737. To sestává v návrhu na osazení distribučních trubek vzduchu do kabiny filtroventilačního systému filtry z nanotextilie s nanostříbrem. Tato varianta byla zvolena jako uživatelsky a konstrukčně nejméně náročná. Cílem totiž nebylo jenom navrhnout vhodný filtr, ale zohlednit i nároky na jeho údržbu a výměnu. Jakékoliv jiné řešení, které bylo uvažováno pak naráželo buď na limity stran potřeby elektrické energie nebo na to, že by konstrukčně bylo velmi složité.

V případě, že by se upustilo od potřeby samostatné dezinfekce filtru, bylo by i tak vhodné zůstat

u nanotextilie, protože jak zdroje, tak naše experimenty hovoří o její dobré účinnosti. Technologie jejich výroby je dnes velmi dobře zvládnuta a není zvlášť nákladná.

Je ale potřeba, v rámci uvažovaného použití nanotextilních filtrů, zdůraznit nutnost dalšího zkoumání a nalezení vhodného nanotextilního materiálu pro filtry určené k použití na palubě letounů. A to včetně mocnosti materiálu a složení jednotlivých vrstev filtru. Z dostupných zdrojů vyplývá, že vlastnosti nanotextilií se mohou různit nejenom kvůli použitému výrobnímu materiálu, ale i kvůli tloušťce a pórovitosti jednotlivých vláken ze stejného materiálu. Bylo by proto vhodné dlouhodobě otestovat různé varianty. Považuji za důležité zmínit, že v případě takového vývoje by se nemělo spoléhat jenom na vlastnosti nového výrobku, ale měl by být testován v dlouhodobém provozu. Důvodem je změna tlaků, teploty a proudění vzduchu stejně jako možnost jeho postupného zanášení. Nový výrobek by tak mohl mít velmi dobré charakteristiky, ale provoz by mohl ukázat, že se např. velmi rychle zanáší prachem a omezuje průtok vzduchu. To by vzhledem k funkci celého filtroventilačního systému, tj. zajištění vhodných podmínek pro přežití, mohlo být vysoce kontraproduktivní.

V neposlední řadě je také nutné sledovat, zda nedochází z navrhovaného filtru k uvolňování nanostříbra a mikroplastů, případně jiných látek. Jak již bylo několikrát zdůrazněno, filtry by byly ve specifickém prostředí, které by mohlo narušovat jejich konzistenci. Jedná se opět především o proud vzduchu, jeho sílu a teplotu.

7. Závěr

Všichni výrobci HEPA filtrů pro uvažované letouny A 320 family a B 737 uvádějí, že jejich výrobky zachycují nejenom bakterie, ale i viry. Na základě zkoumání použitých HEPA filtrů z letounu A 319 můžeme konstatovat, že byla prokázána jejich bakteriální kontaminace, a to jak na vstupní, tak i na výstupní straně, tj. straně která ústí do filtroventilace a která by měla být bez kontaminace. Tento výskyt bakterií vzbuzuje otázku, co se stane, pokud v HEPA filtru přežijí, zda se například nemnoží a z nově vzniklé kolonie nejsou dále distribuovány do vedení filtroventilace a na palubu cestujících. Záchyt virů na HEPA filtrech prokázán nebyl. Různé zdroje pak potvrzují hypotézu, že HEPA filtry na palubách letounů mají vysokou účinnost filtrace, ale záchyt biologických agens je pro ně problémový. To nepřímo dokazuje i popsání šíření virových onemocnění na palubě letounů.

Tento fakt je mimo jiné velmi důležitý pro určování kontaktů orgány ochrany veřejného zdraví. Na základě našich poznatků můžeme říci, že spolehnání se na metodu určení kontaktů založenou na šíření tuberkulózy, která pracuje pouze s přímým přenosem, není vhodné a tato metoda by měla být vždy doplněna jinou, např. cestovatelskou anamnézou. Pokud se jedná o určení kontaktů virových nemocí, můžeme říci, že by se tato metoda neměla používat vůbec.

Na základě výzkumu HEPA filtrů letounu byl proveden experiment s čističkou vzduchu, kdy byl její HEPA filtr osazen na vstupní straně nanotextilií. Čistička byla v provozu v přítomnosti osoby infikované patogenem. Výsledkem byl záchyt tohoto patogenu na nanotextilii, nikoliv na HEPA filtru. Je ale potřeba zmínit, že HEPA filtr zachytil náhodně jiné větší viry.

Tento fakt, spolu s podrobným studiem možností nanotextilií a konstrukce filtroventilace letounů vedl k návrh filtrů z nanotextilií, kterými by se dala filtroventilace předmětných letounů osadit. Při návrhu bylo přihlíženo ke všem zjištěným poznatkům. Cílem byla nejenom efektivní filtrace, ale také ekonomika provozu. Jako vhodné se jeví použití více filtrů tvořených ze tří vrstev ve složení nanotextilie - nanotextilie s nanostříbrem - nanotextilie. Jiné technologie nebyly shledány za vhodné. Vhodný materiál, hustotu a velikost vláken je potřeba dále zkoumat.

Pro osazení filtroventilačního systému těmito filtry byly určeny jako nejdůležitější dva faktory, a to zaprvé, aby bylo co nejméně filtrů, a zadruhé, aby byly filtry co nejdále ve vzduchovém

vedení směrem k cestujícím. Výsledkem je osazení 4 filtry s nanotextilií u letounu A 320 family. U letounů typu 737 je minimální počet odvislý od varianty řešení a délky letounu (3 až 5 filtrů s nanotextilií podle zvolené varianty). Filtry samotné se pak mezi jednotlivými značkami letounů nemusí lišit a lze je používat univerzálně nebo je tvarově přizpůsobit vedení. Jejich návrh pro optimální variantu s dlouhou životností je zobrazen v:

- Příloha 1 – Perspektivní pohled;
- Příloha 2 – Řez A-A;
- Příloha 3 – Řez B-B a detail filtru.

Tuto práci lze brát jako základní úvahu nad účinnosti HEPA filtrů u nejběžněji se vyskytujících letounů. Samotný výzkum, který byl zaměřen na laboratorní zkoumání HEPA filtrů byl doplněn různými zdroji, které samy o sobě přinášejí zajímavé poznatky, ale nemají přesah do dalších problematik. Tato práce se snažila o jejich vzájemné provázání s praktickým důsledkem pro konstrukci letounů, tj. návrhem vhodného zařízení, kterým by se dala zlepšit účinnost filtroventilace. Bohužel pro plně odzkoušený a funkční model by bylo potřeba, aby na výzkumu participovali výrobci letadel a nanotextilií, protože se jedná o multioborový projekt náročný na zdroje i prostředky. Dále by bylo potřeba, aby se na výzkumu podílely také autority provádějící certifikaci letadel.

8. Seznam použité literatury

- [1] *FilmArray® Respiratory Panel 2 (RP2) Testing*. PDF. 2021.
- [2] *BioFire® FilmArray® Pneumonia Panel Testing*. PDF. 2020.
- [3] *Návod k použití respiračního panelu QIAstat-Dx® Respiratory SARS-CoV-2 Panel (příručka)*. PDF. Verze 1. QIAGEN, Březen 2020.
- [4] SHANKAR, Ananda G. et al. Contact Tracing for Influenza A(H1N1)pdm09 Virus–infected Passenger on International Flight. Online. *Emerging Infectious Diseases*. January 2014, roč. 20, č. 1, s. 118-120. Dostupné z: <https://doi.org/10.3201/eid2001.120101>. [cit. 2025-02-01].
- [5] YOUNG, Nicolas et al. International flight-related transmission of pandemic influenza A(H1N1)pdm09: an historical cohort study of the first identified cases in the United Kingdom. Online. *Influenza and Other Respiratory Viruses*. 07 November 2013, roč. 8, č. 1, s. 67-73. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/irv.12181>. [cit. 2025-02-01].
- [6] JOON HYUNG, Kim et al. In-Flight Transmission of Novel Influenza A (H1N1). Online. *Epidemiology and Health*. 2010, roč. 32, č. e2010006, s. 1-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.4178/epih/e2010006>. [cit. 2025-01-30].
- [7] OLSEN, Sonja J., Hsiao-Ling CHANG, Terence Yung-Yan CHEUNG, et al. Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome on Aircraft. *The New England Journal of Medicine* [online]. 2003, 25(349), 2416-2422 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.nejm.org/doi/pdf/10.1056/NEJMoa031349>
- [8] PARKER, Nina; SCHNEEGURT, Mark; THI TU, Anh-Hue; LISTER, Philip Lister a FORSTER, Brian M. *Microbiology*. Nov 01, 2016. OpenStax, 2016. ISBN 978-1-947172-23-4.
- [9] BRUSLIND, Linda. *General Microbiology*. August 1, 2019. Corvallis, OR (USA): Oregon State University, 2016. ISBN 978-1-955101-17-2.

- [10] ROZSYPAL, Hanuš. *Základy infekčního lékařství*. V Praze: Univerzita Karlova, Karolinum, 2015. ISBN 978-80-246-2932-2.
- [11] Risk Assessment for the Transmission of Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus (MERS-CoV) on Aircraft:: A Systematic Review. Online. BERRUGA-FERNÁNDEZ, T. et al. *Epidemiology and Infection*. 10 June 2021, roč. 149, č. 142, s. 1-14. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S095026882100131X>. [cit. 2025-02-22].
- [12] JANIK, Edyta; CERENUGA, Michal; NIEMCEWICZ, Marcin a BIJAK, Michal. Dangerous Pathogens as a Potential Problem for Public Health. Online. *Medicina*. 6 November 2020, roč. 56, č. 11. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/medicina56110591>. [cit. 2025-01-25].
- [13] MCQUISTON, Jennifer H.; MONTGOMERY, Joel M. a HUTSON, Christina L. Ten Years of High-Consequence Pathogens—Research Gains, Readiness Gaps, and Future Goals. Online. *Emerging Infectious Diseases*. 2024, roč. 30, č. 4. Dostupné z: <https://doi.org/10.3201/eid3004.240160>. [cit. 2025-01-25].
- [14] YOUBAO, Zhao et al. Cryptococcus neoformans, a global threat to human health. Online. *Infectious Diseases of Poverty*. Roč. 12, č. 20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s40249-023-01073-4>. [cit. 2025-01-25].
- [15] M'IKANATHA, Nkuchia M.; BREEDLOVE, Byron a WELLIVER, David P. The Spirit of Transportation in a Connected World. Online. *Emerging Infectious Diseases*. 2024, roč. 30, č. 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.3201/eid3002.ac3002>. [cit. 2025-01-25].
- [16] PAVIA, Andrew T. Germs on a Plane: Aircraft, International Travel, and the Global Spread of Disease. Online. *The Journal of Infectious Diseases*. 2007, roč. 195, č. 5, s. 621-622. Dostupné z: <https://doi.org/10.1086/511439>. [cit. 2025-01-25].

- [17] *Tuberculosis and Air Travel*. PDF. THIRD EDITION. WHO Library, 2013. ISBN 978 92 4 154750 5. Dostupné z: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43921/9789241547505_eng.pdf?sequence=1. [cit. 2025-03-02].
- [18] *Risk Assessment Guidelines for Diseases Transmitted on Aircraft: PART 2: Operational Guidelines for Assisting in the Evaluation of risk for Transmission by Disease* [online]. 2. Stockholm: European Centre for Disease Prevention and Control, 2010 [cit. 2022-04-10]. ISBN 978-92-9193-234-4. Dostupné z: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/risk-assessment-guidelines-infectious-diseases-transmitted-aircraft-ragida>
- [19] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. *Mitigation in Airports and on Aircraft*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013. ISBN 978-0-309-28349-6.
- [20] Posouzení metody určení osob v kontaktu s VNN na palubě letadla vycházející ze šíření TBC. In: OBITKOVÁ, Daniela; MRÁZ, Milan a ŠMEHÝLOVÁ, Terézie. *MMK 2022*. Hradec Králové, Česká republika: Magnanimitas, 2022, s. 1150 - 1157. ISBN 978-80-87952-37-5.
- [21] FOXWELL, A. Ruth; ROBERTS, Leslee; LOKUGE, Kamalini a KELLY, Paul M. Transmission of Influenza on International Flights, May 2009. Online. *Emerging Infectious Diseases*. July 2011, roč. 17, č. 7, s. 1188-1194. Dostupné z: <https://doi.org/10.3201/eid1707.101135>. [cit. 2025-02-02].
- [22] TENGFEI, Zhang a Chen QINGYAN. Novel Air Distribution Systems for Commercial Aircraft Cabins. *Building and Environment* [online]. 42(4), 1675-1684 [cit. 2020-08-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000618>
- [23] *Infectious Disease Mitigation in Airports and on Aircraft*. 1st ed. Washington. D.C.: National Academy of Sciences, 2013. ISBN 978-0-309-28349-6.

- [24] *The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 2002. ISBN 0-309-08289-7.
- [25] Letecký předpis L 7: Poznávací značky letadel. In: . MINISTERSTVO DOPRAVY ČR: Řízení letového provozu České republiky, 2023, 472/2011220-SP/5.
- [26] *Orders and Deliveries*. Online. Pioneering sustainable aerospace | Airbus. C2025. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/orders-and-deliveries>. [cit. 2025-02-05].
- [27] *A320 Family - The most successful aircraft family* | Airbus. Online. Pioneering sustainable aerospace | Airbus. C2025. Dostupné z: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-family>. [cit. 2025-02-05].
- [28] KUNDU, Ajoy Kumar. *Aircraft Design*. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-88516-4.
- [29] *Commercial*. Online. The Boeing Company Official Website. C1995-2025. Dostupné z: <https://www.boeing.com/commercial#orders-deliveries>. [cit. 2025-02-05].
- [30] *Orders and Deliveries - Embraer*. Online. Enabling airlines to outperform - Embraer. C2025. Dostupné z: <https://www.embraercommercialaviation.com/orders-and-deliveries/>. [cit. 2025-02-05].
- [31] *Our Aircraft - Embraer*. Online. Enabling airlines to outperform - Embraer. C2025. Dostupné z: <https://www.embraercommercialaviation.com/our-aircraft/>. [cit. 2025-02-05].
- [32] *Technical Training Manual T1+T2 (CFM 56) (Lvl 2&3) Air Conditioning*. Toulouse: Airbus SE, 2013.
- [33] *Airbus A320 CBT # 2 AIR CONDITIONING SYSTEM PRESENTATION (Me)*. Online. A320 MENTOR channel. 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/live/moqYTntMdiA?t=75s>. [cit. 2025-02-07].

- [34] 737-600/700/800/900 Aircraft Maintenance Manual. Chicago: The Boeing Company, 2015.
- [35] Certification Specifications for Large Aeroplanes: CS-25. In: 2007/010/R. European Aviation Safety Agency, 19 September 2007, CS-25.
- [36] TURK, Elisabeth E. Hypothermia. Online. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*. 12 February 2010, č. 6, s. 106-115. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12024-010-9142-4>. [cit. 2025-02-11].
- [37] CONE, James E. a HOCKING, Martin B. Aircraft Cabin Air Quality Trends Relative to Ground Level Standards. Online. In: *Air Quality in Airplane Cabins and Similar Enclosed Spaces*. Springer, C2005, s. 293-315. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/b107249>. [cit. 2025-02-11].
- [38] INDER SINGH, M.B. et al. Acute Mountain Sickness. Online. *High Altitude Medicine & Biology*. 1969, roč. 280, č. 4, s. 175-184. Dostupné z: <https://doi.org/10.1056/NEJM196901232800402>. [cit. 2025-02-11].
- [39] *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.noaa.gov/>. [cit. 2025-02-11].
- [40] FUCHTE, Joerg; NAGEL, Björn a GOLLNICK, Volker. Automatic Fuselage System Layout using Knowledge Based Design Rules. Online. *Deutscher für Luft- und Raumfahrtkongress*. September 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/259895829_Automatic_Fuselage_System_Layout_using_Knowledge_Based_Design_Rules. [cit. 2025-02-11].
- [41] PÉREZ-GRANDE, Isabel a LEO, Teresa J. Optimization of a Commercial Aircraft Environmental Control System. Online. *Applied Thermal Engineering*. 15 August 2002, roč. 22, č. 17, s. 1885-1904. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00130-8). [cit. 2025-02-11].
- [42] 23. *Boeing 737NG - Air Conditioning System*. Online. Learn To Fly. 2021. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KhWjYK0GPZo>. [cit. 2025-02-06].

- [43] KINNISON, Harry A. a TARIQ, Siddiqui. *Aviation Maintenance Management*. Second Edition. United States of America: The McGraw-Hill Companies, C2013, 2014. ISBN 978-0-07-180502-5.
- [44] *Airbus Industrie*. Online. Britannica Money: Where your financial journey begins. C2025. Dostupné z: <https://www.britannica.com/money/Airbus-Industrie>. [cit. 2025-02-10].
- [45] *ATA 21: Airbus A320 (Technical Notes)*. Online. AviationHunt - Hunt For Aviation Resources. C2025. Dostupné z: <https://www.aviationhunt.com/airbus-a320-ata-21/>. [cit. 2025-02-07].
- [46] *Airbus A318/A319/A320/A321 (CFM56) and Airbus A319/A320/A321 (IAE V2500) Continuation training: 21. AIR CONDITIONING & PRESSURIZATION (ATA21)*. PDF. ISSUE 1. Airbus S.A.S., 17 Sep 2015.
- [47] *The Hidden Power: Bleed Air in Aviation*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.aviationfile.com/the-hidden-power-bleed-air-in-aviation/>. [cit. 2025-02-07].
- [48] *BLEED AIR explained*. Online. Tim van Beveren. 2016. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ETRZDsgjEvE>. [cit. 2025-02-07].
- [49] JOLIVET, Xavier; VILLAIN, Xavier a SEGUY, Laurent. A320 Family / A330 Prevention and Handling of Dual Bleed Loss. *Safety first*. 2012, roč. 13, č. January 2012, s. 1-6.
- [50] *A320 AIR CONDITIONING*. Online. Pilot Community. 2021. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=NNH59SetdrY>. [cit. 2025-02-07].
- [51] *ATA 36: Airbus A320 (Technical Notes)*. Online. AviationHunt - Hunt For Aviation Resources. C2025. Dostupné z: <https://www.aviationhunt.com/airbus-a320-ata-36/>. [cit. 2025-02-07].

- [52] *Aircraft Air Conditioning and Pressurization System (ATA 21)*. Online. Stig Aviation. 2024. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=zrZTjznazBM>. [cit. 2025-02-10].
- [53] *CBT - Airbus 320 - Air conditioning, pressurization & ventilation systems*. Online. SkyWay RESERVE CHANNEL. 2021. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=hqmrwVx0EKQ&t=17s>. [cit. 2025-02-07].
- [54] *Air Purification System (APS) for Airbus A320*. Online, PDF. Donaldson Company. C2022.
- [55] *Airbus A320 Enhanced Cabin Air Filtration (HEPA) (1) | ModStore*. Online. ModStore. Dostupné z: <https://modstore.aero/modification/proponent-airbus-a320-enhanced-cabin-air-filtration-hepa-1>. [cit. 2025-02-04].
- [56] *Air Purification System (APS™) for Airbus A320 | ModStore*. Online. ModStore. Dostupné z: <https://modstore.aero/modification/proponent-air-purification-system-aps-for-airbus-a320>. [cit. 2025-02-04].
- [57] *Airbus Cabin Air Filters - Cabin Air Filtration | Pall Shop*. Online. Pall Shop. C2025. Dostupné z: <https://shop.pall.com/us/en/products/cabin-air-filters/zidgxiyphgy>. [cit. 2025-02-04].
- [58] *Advanced Cabin Air Filter For Airbus 320 | Pall Shop*. Online. Pall Shop. C2025. Dostupné z: <https://shop.pall.com/us/en/products/cabin-air-filters/zidhiug8xmo>. [cit. 2025-02-04].
- [59] *Data Sheet AEPC110EN*. Online, PDF. Pall Aerospace. V.FEBRUARY 2019.
- [60] *Boeing 737-130 | The Museum of Flight*. Online. Home | The Museum of Flight. C2025. Dostupné z: <https://www.museumofflight.org/exhibits-and-events/aircraft/boeing-737-130>. [cit. 2025-02-09].
- [61] *The Boeing 737 Technical Site*. Online. C1999. Dostupné z: <http://www.b737.org.uk/>. [cit. 2025-02-06].

- [62] *Airliners.net | Aviation Photography, Discussion Forums & News*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.airliners.net/>. [cit. 2025-02-10].
- [63] *Aircraft Technical Data*. Online. C2025. Dostupné z: <https://www.ultimatespecs.com/aircraft-specs>. [cit. 2025-02-10].
- [64] *Aviation Safety Network*. Online. C2023. Dostupné z: <https://asn.flightsafety.org/>. [cit. 2025-02-10].
- [65] ESPERON-MIGUEZ, Manuel; JENNIONS, Ian K.; CAMACHO ESCOBAR, Ignacio a HANOV, Nile. Simulating faults in a Boeing 737-200 Environmental Control System using a thermodynamic model. Online. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2019, roč. 10, č. 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2019.v10i2.2731>. [cit. 2025-02-06].
- [66] *How an Air Conditioning Pack and Air Cycle Machine Work in Aircraft*. Online. Home - Trans Global Training. 2024. Dostupné z: <https://www.transglobaltraining.com/air-conditioning-pack/>. [cit. 2025-02-06].
- [67] *737 Air Conditioning*. Online. The Boeing 737 Technical Channel. 2021. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=AAy_ch6sfOQ. [cit. 2025-02-06].
- [68] *737NG Air Conditioning System explained | Real 737 Pilot*. Online. A330 Driver. 2023. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=EPfPWYmQV6s>. [cit. 2025-02-06].
- [69] *Boeing 737 | Air Conditioning System*. Online. B737 HUB. 2021. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=dJcYa4DseQY>. [cit. 2025-02-06].
- [70] *HEPA Cabin Air Recirculation Filter: PTI Part Number: 7600002-101*. PDF. C2024. PTI Technologies, 2024.
- [71] *737-300/-400/-500 Maintenance Analysis*. Online. *Aircraft Commerce*. 2005, roč. 41, č. APR/MAY 2005, s. 14-23. Dostupné z: <https://www.aircraft-commerce.com/articles/articles-by-issue-date/>. [cit. 2025-02-05].

- [72] *737-300/400/500 MSG-3 Maintenance Review Board Report: Systems And Powerplant Requirements*. Online, PDF. Sep 25/2016. The Boeing Company, C2009.
- [73] *HEPA Cabin Air Recirculation Filter: PART NUMBER: 1762992*. PDF. Purolator Facet.
- [74] *P199753: FILTER: AIR,CABIN,HEPA*, | *Boeing Shop*. Online. Boeing Shop. C2025. Dostupné z: <https://shop.boeing.com/aviation-supply/p/P199753=K3>. [cit. 2025-02-07].
- [75] *Boeing Cabin Air HEPA Filters*. Online. Pall Shop | Filters, Systems & Solutions - Industrial. C2025. Dostupné z: <https://shop.pall.com/us/en/products/cabin-air-filters/zidgxiyphh4>. [cit. 2025-02-07].
- [76] *737 Electrical Equipment Bay*. Online. The Boeing 737 Technical Channel. 2022. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_VbRE2tO4EA&t=1838s. [cit. 2025-02-06].
- [77] *737-7/8/8200/9/10: Airplane Recovery Document*. PDF. The Boeing Company, C2016-2023.
- [78] *Airplane Rescue and Fire Fighting Information: 737-100/-200/-400/-500 series*. PDF. The Boeing Company, 2024.
- [79] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN 1822-1, *Vysoce účinné filtry vzduchu (EPA, HEPA a ULPA): Část 1: Klasifikace, ověřování vlastností, označování*. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [80] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 29463-2, *Vysoce účinné filtry a filtrační materiály pro odlučování částic ze vzduchu: Část 2: Výroba aerosolu, měřicí zařízení a statické počítání částic*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.

- [81] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 29463-3, *Vysoce účinné filtry a filtrační materiály pro odlučování částic ze vzduchu: Část 3: Zkoušení plochých filtračních materiálů*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [82] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 29463-4, *Vysoce účinné filtry a filtrační materiály pro odlučování částic ze vzduchu: Část 4: Zkušební metoda pro stanovení propustnosti filtračních prvků - skenovací metoda*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [83] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 29463-5, *Vysoce účinné filtry a filtrační materiály pro odlučování částic ze vzduchu: Část 5: Zkušební metoda pro filtrační prvky*. Česká agentura pro standardizaci, 2022.
- [84] HEPA filters. *Journal of the American Biological Safety Association*. 1998, roč. 3, č. 1, s. 33-42.
- [85] TCHARKHTCHI, A. et al. An Overview of Filtration Efficiency Through the Masks: Mechanisms of the Aerosols Penetration. Online. *Bioactive Materials*. January 2021, roč. 6, č. 1, s. 106-122. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.08.002>. [cit. 2025-01-26].
- [86] SOLEHA, Tri Umiana et al. The Effectiveness of Using HEPA Filters in Reducing the Number of Airborne Bacteria in the Operating Room Area. Online. In: *The 4th I'nternational Conference on Applied Sciences, Mathematics, and Informatics*. Bandar Lampur, Indonesia: AIP Publishing, 2022. ISBN 1551-7616. ISSN 0094-243X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0209846>. [cit. 2025-01-26].
- [87] KOBE R., Schrank et al. *Final Status of HEPA Filter 10-Year Lifetime Evaluation*. Richland, WA (United States): Pacific Northwest National Lab., 2020.
- [88] Effectiveness of Heating, Ventilation and Air Conditioning System With HEPA Filter Unit on Indoor Air Quality and Asthmatic Children's Health. Online. *Building and Environment*. February 2010, roč. 45, č. 2, s. 330-337. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.010>. [cit. 2025-01-26].

- [89] ORR, Matteson a ORR, Clive. *Filtration : Principles and Practices, Second Edition, Revised and Expanded*. Second Edition. CRC Press, 1986. ISBN 9780824775827.
- [90] MITTAL, Himanshu; POTTAGE, Thomas; PARKS, Simon a WALKER, James T. Survival of Microorganisms on HEPA Filters. Online. *Applied Biosafety*. 2011, roč. 16, č. 3, s. 134–142. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/153567601101600305>. [cit. 2025-03-02].
- [91] OBITKOVÁ, Daniela; MRÁZ, Milan a PAVLÍK, Emil. Virus Removal by High-efficiency Air (HEPA) Filters and Filtration Capacity Enhancement by Nanotextiles: A Pilot Study. Online. *Folia Microbiologica*. 2024, roč. 5, č. 69, s. 459-464. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12223-024-01137-4>. [cit. 2025-01-26].
- [92] RAVICHANDRAN, Rajeswari et al. Advances in Polymeric Systems for Tissue Engineering and Biomedical Applications. Online. *Macromolecular Bioscience*. 25 January 2012, roč. 12, č. 3, s. 286-311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/mabi.201100325>. [cit. 2025-01-28].
- [93] RASOULI, Rahimeh; AHMED, Barhoum; MIKHAEL, Bechelany a ALAIN, Dufresne. Nanofibers for Biomedical and Healthcare Applications. Online. *Macromolecular Bioscience*. 25 January 2012, roč. 19, č. 2, s. 1800256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/mabi.201800256>. [cit. 2025-01-28].
- [94] JAZIE, Ali A.; ALBAAJI, Amar J. a ABED, Suhad A. A Review on Recent Trends of Antiviral Nanoparticles and Airborne Filters: Special Insight on COVID-19 Virus. Online. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 17 June 2021, roč. 14, č. 1, s. 1811–1824. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01055-1>.
- [95] NARAGUND, Veereshgouda S. a PANDA, P.K. Electrospun Nanofiber-based Respiratory Face Masks — A Review. Online. *Emergent Materials*. 25 January 2022, roč. 5, s. 261-278. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s42247-022-00350-6>.

- [96] MIKEŠ, Petr a LUKÁŠ, David. *Fyzikální principy tvorby nanovláken I*. Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-249-5.
- [97] LEV, J.; KALHOTKA, L. a ČERNÝ, M. Nanotextilní membrány pro zachycení bakterií *Escherichia coli*. Online. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2010, roč. LVIII, č. 5, s. 239-246. Dostupné z: <https://doi.org/10.11118/actaun201058050239>. [cit. 2025-02-02].
- [98] LUKÁŠ, D. et al. Physical Principles of Electrospinning (Electrospinning as a Nano-scale Technology of the Twenty-first Century). Online. *Textile Progress*. 2009, roč. 41, č. 2, s. 59-140. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00405160902904641>. [cit. 2025-02-02].
- [99] MUHAMMAD, Ali et al. Advances in Air Filters Based on Electrospun Nanofibers. Online. *Environmental Contaminants Reviews*. 2020, roč. 3, č. 1, s. 32-36. Dostupné z: <https://doi.org/10.26480/ecr.01.2020.32.36>. [cit. 2025-02-03].
- [100] HE, Bai at al. Micro-scale Layered Structural Filtration Efficiency Model: Probing Filtration Properties of Non-uniform Fibrous Filter Media. Online. *Separation and Purification Technology*. 6 September 2019, roč. 236, č. 116037, s. 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116037>. [cit. 2025-02-16].
- [101] AHN, Y.C. et al. Development of High Efficiency Nanofilters Made of Nanofibers. Online. *Current Applied Physics*. October 2006, roč. 6, č. 6, s. 1030-1035. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2005.07.013>. [cit. 2025-02-03].
- [102] BECKMAN, Ivan P.; BERRY, Gentry; CHO, Heejin a RIVEROS, Guillermo. Alternative High-Performance Fibers for Nonwoven HEPA Filter Media. Online. *Aerosol Science and Engineering*. 18 October 2022, roč. 7, s. 36-58. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s41810-022-00161-6>. [cit. 2025-02-03].

- [103] PODGÓRSKI, Albert; BAŁAZY, Anna a GRADON', Leon. Application of Nanofibers to Improve the Filtration Efficiency of the Most Penetrating Aerosol Particles in Fibrous Filters. Online. *Chemical Engineering Science*. 18 July 2006, roč. 61, č. 20, s. 6804-6815. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.07.022>. [cit. 2025-02-14].
- [104] YE, Bian; SHIJIE, Wang; CHEN, Chun a CHUN, Chen. Influence of Fiber Diameter, Filter Thickness, and Packing Density on PM2.5 Removal Efficiency of Electrospun Nanofiber Air Filters for Indoor Applications. Online. *Building and Environment*. March 2020, roč. 170, č. 106628, s. 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106628>. [cit. 2025-02-14].
- [105] ZHE, Wang a PAN, Zhijuan. Preparation of Hierarchical Structured Nano-sized/porous poly(lactic acid) Composite Fibrous Membranes for air Filtration. Online. *Applied Surface Science*. 30 November 2015, roč. 356, s. 1168-1179. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.211>. [cit. 2025-02-16].
- [106] LU, Zhang et al. Multilayer Electrospun Nanofibrous Membranes with Antibacterial Property for Air Filtration. Online. *Applied Surface Science*. 15 June 2020, roč. 515, č. 145962, s. 1-10. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145962>. [cit. 2025-02-20].
- [107] LORENZ, C. et al. Characterization of Silver Release from Commercially Available Functional (Nano)textiles. Online. *Chemosphere*. October 2012, roč. 89, č. 7, s. 817-824. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.063>. [cit. 2025-02-20].
- [108] JEEVANANDAM, Jaison et al. Synthesis Approach-dependent Antiviral Properties of Silver Nanoparticles and Nanocomposites. Online. *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 15 January 2022, roč. 2022, č. 12, s. 809-831. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40097-021-00465-y>. [cit. 2025-02-20].

- [109] HARTEMANN, Philippe et al. Nanosilver: Safety, Health and Environmental Effects and Role in Antimicrobial Resistance. Online. *Materials Today*. 2015, roč. 18, č. 3, s. 122-123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.02.014>. [cit. 2025-02-20].
- [110] *European Commission, official website - European Commission*. Online. 2025. Dostupné z: <https://commission.europa.eu/>. [cit. 2025-02-20].
- [111] *Homepage - ECHA*. Online. 2025. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/>. [cit. 2025-02-20].
- [112] *Vyvinuli jsme filtrační materiál, který je možno sterilizovat elektrickým proudem a opakovaně používat - FEL ČVUT*. Online. Fakulta elektrotechnická ČVUT - FEL ČVUT. C2025. Dostupné z: <https://fel.cvut.cz/cs/aktualne/novinky/27968-vyvinuli-jsume-filtracni-material-ktery-je-mozno-sterilizovat-elektrickym-proudem-a-opakovane-pouzivat>. [cit. 2025-02-16].
- [113] *Filter Insert and Device for Sterilization and/or Disinfection Thereof (USA)*. České vysoké učení technické v Praha. Přihl.: May 28, 2021. Uděl.: Jun. 29, 2023. US 2023/0201401.
- [114] KURSTAK, Edouard a KURSTAK, Christine. *Comparative Diagnosis of Viral Diseases: Vertebrate Animal and Related Viruses Part B—DNA Viruses*. V. 4. Elsevier, 2012. ISBN 0-12-429704-8.
- [115] KAMPF, G.; VOSS, A. a SCHEITHAUER, S. Inactivation of Coronaviruses by Heat. Online. *The Journal of Hospital Infection*. Juna 2020, roč. 105, č. 2, s. 348-349. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.03.025>. [cit. 2025-02-16].
- [116] Using heat to kill SARS-CoV-2. Online. *Reviews in Medical Virology*. 02 July 2020, roč. 30, č. 5, s. e2115. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/rmv.2115>. [cit. 2025-02-16].

- [117] HESSLING, Martin et al. Heat Inactivation of Influenza Viruses—Analysis of Published Data and Estimations for Required Decimal Reduction Times for Different Temperatures and Media. Online. *Microbiology Research*. 20 October 2022, roč. 13, č. 4, s. 853-871. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/microbiolres13040060>. [cit. 2025-02-16].
- [118] ELVEBORG, Simon; MONTEIL, Vanessa M. a ALI, Mirazimi. Methods of Inactivation of Highly Pathogenic Viruses for Molecular, Serology or Vaccine Development Purposes. Online. *Pathogens*. 19 February 2022, roč. 11, č. 2, s. 1-25. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/pathogens11020271>. [cit. 2025-02-16].
- [119] JING, Wu; YOUSEF, Alipouri; HAO, Luo a LEXUAN, Zhong. Ultraviolet Photocatalytic Oxidation Technology for Indoor Volatile Organic Compound Removal:: A Critical Review with Particular Focus on Byproduct Formation and Modeling. Online. *Journal of Hazardous Materials*. 5 January 2022, roč. 421, č. 126766, s. 1-13. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126766>. [cit. 2025-02-20].
- [120] HODGSON, Alfred T.; DESTAILLATS, Hugo; HOTCHI, Toshifumi a FISK, William J. *Evaluation of a Combined Ultraviolet Photocatalytic Oxidation (UVPKO)/Chemisorbent Air Cleaner for Indoor Air Application*. PDF. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.
- [121] *Training Manual A 319/320/321: ETA 24 Electrical Power Line & Base Maintenance*. PDF. JAN. 1998. 1998.
- [122] *Training Manual B 737-300/400/500: ATA 24 Electrical Power*. PDF. Jan. 2000. 1995.
- [123] MADSEN, Eugene L. *Environmental Microbiology:: From Genomes to Biogeochemistry*. 2nd Edition. Wiley-Blackwell, September 2015. ISBN 78-1-118-43963-0.

- [124] DO NASCIMENTO, Jean Phellipe Marques et al. Antibiotic Resistance and Biofilm Synthesis Genes in Airborne Staphylococcus in Commercial Aircraft Cabins. Online. *Aerobiologia*. 05 July 2021, roč. 37, s. 733-753. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/s10453-021-09714-7\(0123456789\(\),-volV\)](https://doi.org/10.1007/s10453-021-09714-7(0123456789(),-volV)). [cit. 2025-02-27].
- [125] XIA, Li et al. Wearing Time and Respiratory Volume Affect the Filtration Efficiency of Masks Against Aerosols at Different Sizes. Online. *Environmental Technology & Innovation*. 2022, roč. 25, č. 102165, s. 1-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102165>. [cit. 2025-03-02].
- [126] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN 149+A1, *Ochranné prostředky dýchacích orgánů - Filtrační polomasky k ochraně proti částicím: Požadavky, zkoušení a značení*. Česká agentura pro standardizaci, 2009.
- [127] CODE OF FEDERAL REGULATIONS. 42 CFR Part 84, *Approval of Respiratory Protective Devices*. United States Department of Health and Human Services, U. S. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Dostupné také z: <https://www.ecfr.gov/current/title-42/part-84>.
- [128] Mimořádné opatření. In: *MZDR 15757/2020-44/MIN/KAN*. Ministerstvo zdravotnictví ČR, 2021.
- [129] SCHREIBER, Johannes; BRÜGGMANN, Dörthe; BRAUN, Markuc a GRONEBERG, David A. The Measuring Aerosol Spreading During Countermeasures (MASC) Study Presents an Automated System to Investigate Face Mask Efficacy and Other Aerosol Countermeasures in Varying Environments. Online. *Scientific Reports*. 2022, roč. 12, č. 21349, s. 1-11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25210-5>. [cit. 2025-03-02].
- [130] SILCOTT, David et al. *TRANSCOM/AMC Commercial Aircraft Cabin Aerosol Dispersion Tests*. PDF. Revision. 2020. Dostupné také z: <https://www.ustranscom.mil/cmd/docs/TRANSCOM%20Report%20Final.pdf>.

- [131] Mask-wearing Intentions on Airplanes During Covid-19 – Application of Theory of Planned Behavior Model. Online. *Transport Policy*. 2022, roč. 119, č. April 2022, s. 32-44. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.01.023>. [cit. 2025-03-02].
- [132] SUSSMAN, Max. *Molecular Medical Microbiology*. 2002. ISBN 978-0-12-677530-3.
- [133] MONTGOMERIE, John Z.; Epidemiology of Klebsiella and Hospital-Associated Infections. Online. *Reviews of Infectious Diseases*. 1979, roč. 1, č. 5, s. 736-753. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/4452369>. [cit. 2025-02-22].
- [134] BOTELHO-NEVERS, E. et al. Chronic Nasal Infection Caused by Klebsiella Rhinoscleromatis or Klebsiella Ozaenae:: Two Forgotten Infectious diseases. Online. *International Journal of Infectious Diseases*. September 2007, roč. 11, č. 5, s. 423-429. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2006.10.005>. [cit. 2025-02-22].
- [135] BAMFORD, Dennis H. a ZUCKERMAN, Mark. *Encyclopedia of Virology*. Online. Fourth Edition. Academic Press, 2021. ISBN 978-0-12-814516-6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128145166/encyclopedia-of-virology>. [cit. 2025-02-22].

9. Seznam zkratek

APU – Auxiliary Power Unit

C/B panel – Circuit Breaker Panel

ECS – Environmental Control System

ECHA – European Chemicals Agency

E&E Bay – Electrical and Electronics Bay

GPU – Ground Power Uni

G+ – Grampozitivní

G– – Gramnegativní

HEPA – High-Efficiency Particulate Air

HIV – Human Immunodeficiency Virus

ICA – Intercellular Adhesion

n. m. – nad mořem

NG – Next Generation

PCR – Polymerase Chain Reaction

PLA-P – Porous Poly(lactic acid)

PLA-N – Nano-Sized Poly(lactic acid)

RAT – Ram Air Turbine

REACH – Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

RT-PCR – Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction

SCENIHR – Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks

VNN – Vysoce nakažlivá nemoc

10. Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 – Příprava odběru vzorků z HEPA filtru letounu.

Obrázek 2 – Rozložení nemocných cestujících na letu Cancún – Birmingham [5]

Obrázek 3 – Rozložení nemocných cestujících na letu Los Angeles – Soul [6]

Obrázek 4 – Rozložení nemocných cestujících na letu Hongkong – Peking [7]

Obrázek 5 – Schéma distribuce vzduchu v letounech

Obrázek 6 – Schéma filtroventilačního systému letounů

Obrázek 7 – Přetlakové ventily u letounů A 320

Obrázek 8 – Schéma vedení Bleed Air u A 320 family (zaměřeno na filtroventilaci)

Obrázek 9 – Poloha klimatizačních jednotek u A 320

Obrázek 10 – Schéma klimatizační jednotky u A 320

Obrázek 11 – Fotografie klimatizační jednotky 1 u A 320

Obrázek 12 – Umístění HEPA filtrů a směšovače v A 320

Obrázek 13 – Systém filtroventilace v A 320

Obrázek 14 – HEPA filtr pro A 320 family (Donaldson Company) [54]

Obrázek 15 – Distribuce vzduchu do pilotní kabiny letounu A 320

Obrázek 16 – Detail umístění distribučních trubek u A 320

Obrázek 17 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu A 320

Obrázek 18 – Schéma vedení Bleed Air u B 737 (zaměřeno na filtroventilaci)

Obrázek 19 – Schéma klimatizační jednotky u B 747

Obrázek 20 – Fotografie klimatizační jednotky B 737

Obrázek 21 – Umístění HEPA filtrů a směšovače v B 737

Obrázek 22 – Systém filtroventilace v B 737

Obrázek 23 – HEPA filtr pro B 737 (PTI Technologies) [70]

Obrázek 24 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu B 737-700

Obrázek 25 – Distribuce vzduchu v letounu B 737 s krátkou variantou trupu

Obrázek 26 – Distribuce vzduchu do kabiny cestujících letounu B 737-800

Obrázek 27 – Distribuce vzduchu v letounu B 737 s dlouhou variantou trupu

Obrázek 28 – HEPA filtr z čističky vzduchu

Obrázek 29 – Pilotní pokus s nanotextilním filtrem

Obrázek 30 – Schéma elektrostatického zvlákňování s jehlou

Obrázek 31 – Rozdíl v propustnosti filtrů

Obrázek 32 – Srovnání vláken HEPA filtru (a) a nanovláken (b) při stejném zvětšení. [102]

Obrázek 33 – Póry na vláknech textilie [105]

Obrázek 34 – Osazení letounů A 320 family nanotextilními filtry

Obrázek 35 – Osazení krátkých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta A)

Obrázek 36 – Osazení dlouhých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta A)

Obrázek 37 – Osazení krátkých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta B)

Obrázek 38 – Osazení dlouhých letounů B 737 nanotextilními filtry (varianta B)

11. Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 – Spektrum respiračního panelu analyzátoru BioFire FilmArray 2.0 [1]

Tabulka 2 – Spektrum plicního panelu analyzátoru BioFire FilmArray 2.0 [2]

Tabulka 3 – Spektrum respiračního panelu SARS CoV-2 pro QIAStat DX® Analyzer 1.0 [3]

Tabulka 4 – Použití panelů při zkoumání nanotextilie z HEPA filtru čističky vzduchu

Tabulka 5 – Použité chemikáli

Tabulka 6 – Použitý materiál a zařízení

Tabulka 7 – Velikost biologických agens (všeobecně) [8][9]

Tabulka 8 – Velikost agens VNN

Tabulka 9 – Velikost agens ostatních nemocí spojených s letectví

Tabulka 10 – Filtry pro A 320 family a jejich výrobcem deklarovaná záchytnost [54][55][56]
[57][58][59]

Tabulka 11 – Modely letounů B 737 s jedním HEPA filtrem [61][62][63][64]

Tabulka 12 – Modely letounů B 737 se dvěma HEPA [61][62][63][64]

Tabulka 13 – Filtry pro B 737 filtry a jejich výrobcem deklarovaná záchytnost [70][71][72]
[73][74][75]

Tabulka 14 - Přežití bakterií na HEPA filtru [90]

Tabulka 15 – Inaktivace vybraných virů teplotou [114][115][116][117][118]

Tabulka 16 – Mikroorganismy zachycené na vstupních a výstupních straně HEPA filtru (G+)

Tabulka 17 – Výsledky laboratorního zkoumání HEPA filtru (G–)

Tabulka 18 – Výsledky použitého HEPA filtru čističky vzduchu

Tabulka 19 – Výsledky samotné nanotextilie v čističce vzduchu

Tabulka 20 – Výsledky pilotního projektu

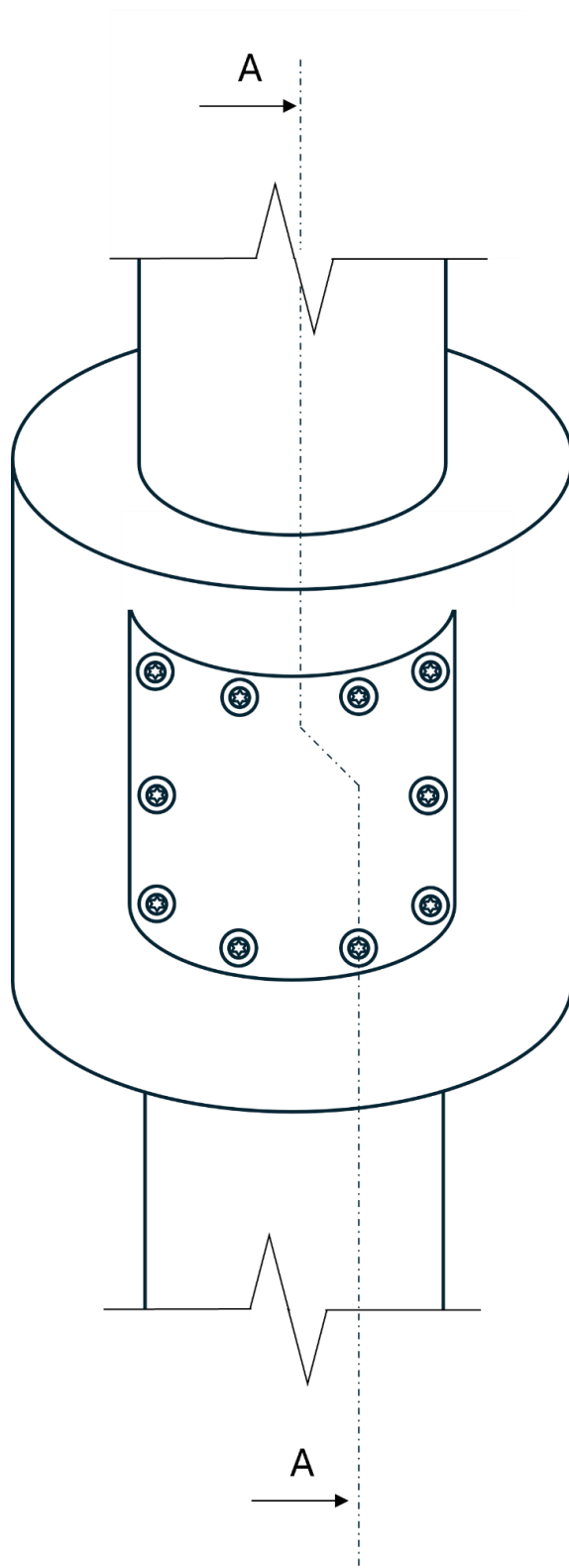
12. Seznam příloh

Příloha 1 – Perspektivní pohled

Příloha 2 – Řez A-A

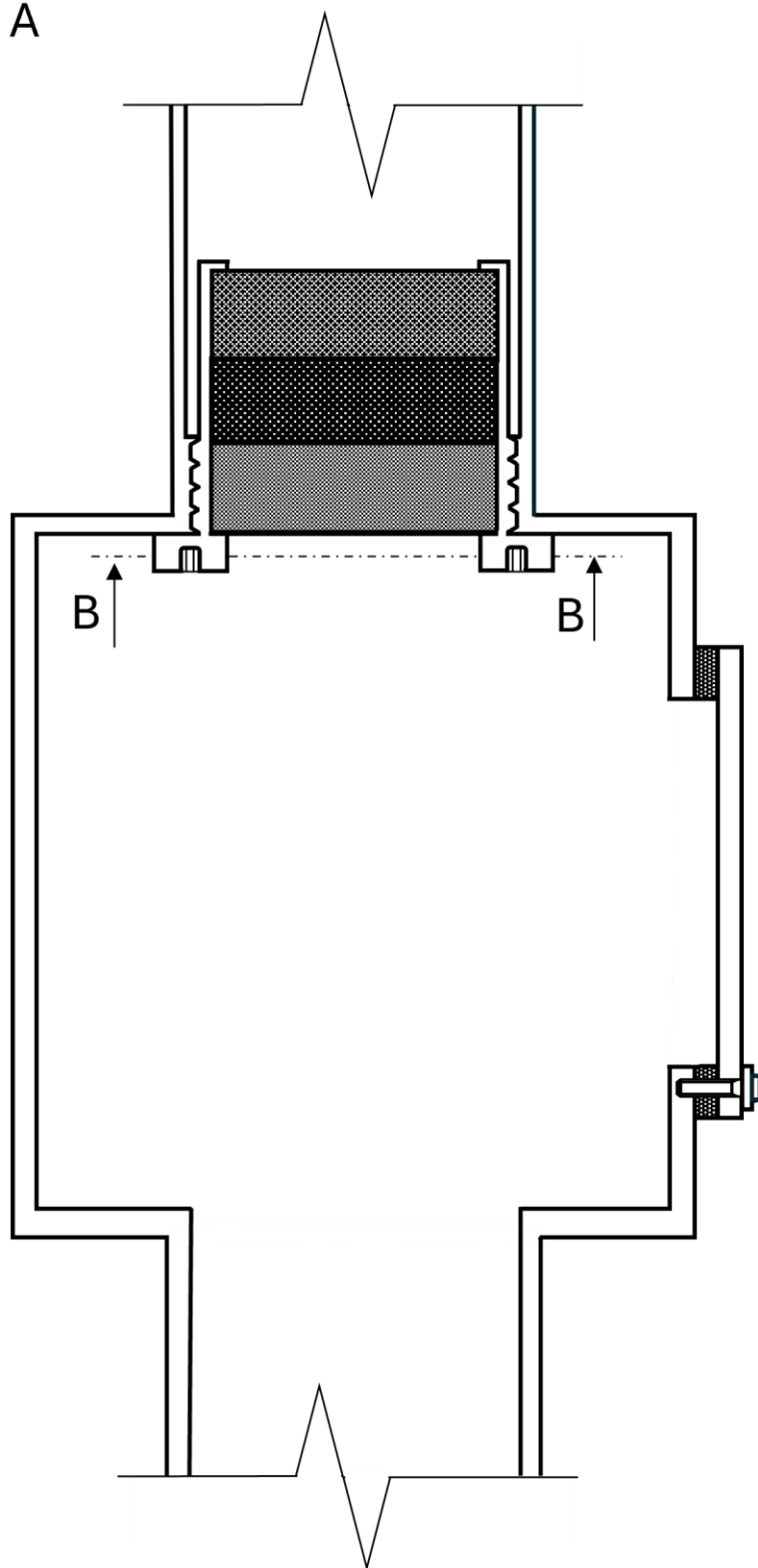
Příloha 3 – Řez B-B a detail filtru

Příloha 1 – Perspektivní pohled



Příloha 2 – Řez A-A

A – A



Příloha 3 – Řez B-B a detail filtru

B – B

